

Ein Beitrag zur Feuchtekompensation von Präzisionsmeßgeräten

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)

eingereicht an der
Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Ilmenau

von Dipl.-Ing. Falko Hilbrunner,

Gutachter: Herr Uni.-Prof. Dr.-Ing. habil. Jäger, TU Ilmenau
 Herr Uni.-Prof. Dr.-Ing. Holzapfel, Universität Kassel
 Herr Dr. rer. nat. Berg, Sartorius AG Göttingen

eingereicht: 18.10.2004
verteidigt: 15.06.2005
Verfahrensnummer: MB 123

Kurzfassung

Eine Entwicklungsrichtung zur Reduzierung der Meßunsicherheit von Präzisionsmeßgeräten ist die Minimierung von Querempfindlichkeiten der Meßgeräte auf Störgrößen.

Zu den Störgrößen zählen alle auf ein Meßgerät wirkenden Einflüsse außer der eigentlichen Meßgröße. Eine wesentliche Rolle spielen die drei Klimagrößen Temperatur, Luftfeuchte und Luftdruck.

Stand der Technik ist, daß ein Großteil der heutigen Präzisionsmeßgeräte über eine weitgehende Störgrößenunterdrückung verfügt. Besonders das Gebiet der Reduzierung der Feuchteabhängigkeit bietet jedoch noch erhebliches Potential zur weiteren Verringerung der Meßunsicherheit.

Die vorliegende Arbeit stellt eine systematische Vorgehensweise zur Erzielung eines feuchteunabhängigen Meßgerätes vor. Ausgehend von den Ursachen der Feuchteabhängigkeit werden Methoden zur Reduzierung der Feuchteabhängigkeit abgeleitet. Diese Methoden lassen sich in zwei Kategorien einteilen:

1. Minimierung des für die Feuchteabhängigkeit verantwortlichen Feuchtetransportes.
2. Kompensation der Feuchteabhängigkeit auf der Basis mathematischer Methoden.

Der Feuchtetransport läßt sich durch die Konstanthaltung der relativen Feuchte im Meßgerät, z. B. durch Feuchtepufferung, fast vollständig unterbinden. Weiterhin kann das Eindringen von Feuchtigkeit in Bauteile durch konstruktive Maßnahmen wie Kapselung, Versiegelung und Abdichtung reduziert werden.

Unter einer Vielzahl von Varianten zur Modellierung des Verhaltens von Systemen sind sogenannte Polynommodelle zur mathematischen Feuchtekompensation besonders gut geeignet. Durch diese Modelle ist es möglich, die statische und die dynamische Feuchteabhängigkeit gemeinsam zu beschreiben. Wesentlichen Einfluß auf die Güte einer mathematischen Kompensation hat neben der Modellstruktur auch die Darstellungsvariante der Feuchte (relative Feuchte, absolute Feuchte, Dampfdruck, Taupunkttemperatur und ähnliche).

Zur Ermittlung der Feuchteabhängigkeit von Präzisionsmeßgeräten sind experimentelle Untersuchungen erforderlich. Da zwischen Temperatur- und Feuchteabhängigkeit Wechselwirkungen bestehen, müssen die zeitlichen Verläufe von Lufttemperatur und Luftfeuchte orthogonal sein. Nur unter dieser Voraussetzung können aus den Experimenten statistisch gesicherte Aussagen zur Temperatur- und Feuchteabhängigkeit getroffen werden.

Abstract

For reducing the measuring uncertainty of precision measuring devices, one possibility is to minimise the transverse sensitivity of measuring devices to disturbance quantities.

The disturbance quantities include all influence factors which have an effect on a measuring device, except for the measuring quantity itself. An essential role is played by the three climatic factors temperature, air humidity and air pressure.

The state-of-the-art of the modern precision measuring devices is that many of them are equipped with a system for disturbance factor suppression to a large extent. Anyway, particularly the possibility of reducing moisture dependence constitutes an important potential for a further reduction of the measuring uncertainty.

This paper presents a systematic approach to realising a moisture-independent measuring device. Starting from the causes of moisture dependence, methods for diminishing this kind of dependence are derived. They can be grouped in two categories:

1. Minimising the humidity transport which is responsible for moisture dependence.
2. Compensation of moisture dependence on the basis of mathematical methods.

The humidity transport can be prevented almost completely by keeping the relative humidity in the measuring devices constant, for example by moisture buffering. In addition, it can be reduced by applying a number of design measures such as encapsulation, sealing and damp-proofing.

There are numerous methods of modelling the behaviour of systems, of which so-called polynomial models for the mathematical moisture compensation are particularly suitable. These models permit the user to describe both the static and the dynamic moisture dependence together. An important influence on the quality of a mathematical compensation is exerted not only by the model structure, but also by the moisture representation variant (relative humidity, absolute humidity, vapour pressure, dew-point temperature and the like).

For determining the moisture dependence of precision measuring devices, experimental investigations are necessary. As the temperature and the moisture dependence interact, the variations in time of the air temperature and humidity must be orthogonal. Only under this condition, statistically solid statements on the temperature and moisture dependence can be derived from the experiments.

Vorwort und Dank

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut Prozeßmeß- und Sensortechnik der Technischen Universität Ilmenau.

Mein Dank gilt Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Jäger und Prof. Dr.-Ing. habil. Rainer Grünwald. Durch die Bereitstellung finanzieller und materieller Mittel ermöglichten sie mir eine reibungsfreie Tätigkeit. Weiterhin möchte ich Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Jäger für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit danken.

Den Ausgangspunkt der Untersuchungen zur Feuchtekompensation von Präzisionsmeßgeräten bildete die Kooperation mit der Sartorius AG.

Für die Koordinierung der Zusammenarbeit auf diesem Gebiet und für fachliche Anregungen möchte ich Herrn Dr. Christoph Berg, Sartorius AG, herzlich danken.

Mein besonderer Dank gilt Dr. Thomas Fröhlich und Dr. Götz Blumröder für die dauerhaft gute Zusammenarbeit. In zahlreichen Diskussionen halfen sie mir, Probleme aus einem anderen Blickwinkel zu betrachten. Ihre Anregungen und Kritik trugen wesentlich zur konsequenten Bearbeitung der Thematik bei.

Für die Unterstützung beim Erstellen experimenteller Aufbauten möchte ich Matthias Röser danken.

Allen Mitarbeitern des Institutes Prozeßmeß- und Sensortechnik danke ich für das angenehme Arbeitsklima.

Für die zahlreichen Hinweise in Fragen der deutschen Grammatik gilt mein Dank Dr. Eva-Maria Ganschietz.

Ein besonderes Dankeschön geht an Miriam und Vincent.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
2	Grundlagen zur Feuchte und zum Feuchtetransport	11
2.1	Beschreibung des Zustandes der feuchten Luft	11
2.2	Mathematische Beschreibung von Diffusionsvorgängen	13
2.3	Feuchtetransport in porösen Feststoffen	13
2.4	Analytische Darstellung des Sorptionsgleichgewichtes	17
2.4.1	Sorptionsisotherme nach Langmuir	17
2.4.2	BET-Sorptionsisothermengleichung	17
2.4.3	BDDT-Sorptionsisotherme	18
2.4.4	Gültigkeitsbereich der Sorptionsisothermengleichungen	18
3	Grundlagen experimenteller Untersuchungen	20
3.1	Voraussetzungen zur Durchführung von Feuchteuntersuchungen an Präzisionsmeßgeräten	20
3.2	Vergleich meßtechnischer Eigenschaften verschiedener Feuchtesensoren	22
3.2.1	Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen	25
3.2.2	Einordnung der Ergebnisse	26
3.3	Methoden zur Erzeugung definierter Luftfeuchten	27
3.3.1	Salzhygrostat	28
3.3.2	Separater Befeuchter und Trockner	28
3.3.3	Kombinierter Befeuchter und Trockner	31
3.3.4	Silikagelhygrostat	31
3.4	Optimale Regelung der Luftfeuchte	35
3.5	Versuchsplanung	36
4	Einfluß der Luftfeuchte auf Präzisionsmeßgeräte	39
4.1	Ursachen der Feuchteabhängigkeit	39
4.2	Feuchtetransport zwischen Meßgerät und Umgebung	43
4.2.1	Diffusiver Feuchtetransport	44
4.2.2	Strömungsbedingter Feuchtetransport	48
4.2.3	Temperaturbedingter Feuchtetransport	48
4.2.4	Druckbedingter Feuchtetransport	50
4.3	Experimentelle Untersuchung des Feuchtetransportes in ein Testgehäuse	50

4.3.1	Aufbau des Testgehäuses	50
4.3.2	Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen	51
4.3.3	Verifikation der theoretischen Betrachtungen anhand der experimentellen Untersuchungen	52
5	Methoden zur Reduzierung der Feuchteabhängigkeit von Präzisionsmeßgeräten	54
5.1	Einsatz von Puffermaterialien zur Stabilisierung der Gehäusefeuchte	55
5.1.1	Modell eines Gehäuses mit Puffermaterial	55
5.1.2	Berechnung der Luftfeuchte in einem feuchtegepufferten Gehäuse ohne feuchtaufnehmende Bauteile	56
5.1.3	Simulation der Feuchtekonzentration im Gehäuse bei variierenden Gehäuseparametern	58
5.1.4	Silikagel als Feuchtepuffer	61
5.1.5	Art-Sorb-Platten als Feuchtepuffer	62
5.1.6	Entwicklungstendenzen bei feuchtepuffernden Materialien	63
5.1.7	Untersuchungen zur Feuchtepufferung an einem Testgehäuse	63
5.2	Konstruktive Möglichkeiten zur Reduzierung des Feuchteverhaltens von Einzelbauteilen	65
5.2.1	Kapselung	65
5.2.2	Abdichtung	67
5.2.3	Versiegelung	68
5.3	Mathematische Feuchtekompensation	71
5.3.1	Grundstruktur und Wirkungsweise von mathematischen Feuchtekompensationen	71
5.3.2	Betrachtungen zur Berechtigung von mathematischen Feuchtekompensationen	74
5.3.3	Statische Feuchtekompensation mit Sorptionsmodellen	75
5.3.4	Feuchtekompensation basierend auf Polynommodellen	76
5.3.5	Statische Kompensation mittels stückweiser Interpolation	80
5.3.6	Einfluß der Feuchtedarstellung auf die Güte einer Feuchtekompensation und auf das Temperaturverhalten	83
5.3.7	Minimierung des Feuchteinflusses durch geeignete Wahl der Feuchtedarstellung	87
5.3.8	Mathematische Kompensation der Feuchteabhängigkeit am Beispiel einer Präzisionswaage	88
6	Zusammenfassung	95
	Literaturverzeichnis	98
	Zeichen und Abkürzungen	100

1 Einleitung

Die Zielstellung der vorliegenden Arbeit ist die Reduzierung der Meßunsicherheit von Präzisionsmeßgeräten. Neben der Weiterentwicklung der Meßprinzipien und der Verringerung von Fertigungstoleranzen ist die Minimierung von Querempfindlichkeiten der Meßgeräte auf Störgrößen eine entscheidende Entwicklungsrichtung.

Zu den Störgrößen zählen prinzipiell alle auf das Meßgerät wirkenden Einflüsse außer der eigentlichen Meßgröße. Eine wesentliche Rolle spielen die drei Klimagrößen Temperatur, Luftfeuchte und Luftdruck.

Stand der Technik ist, daß ein Großteil der heutigen Präzisionsmeßgeräte über eine weitgehende Störgrößenunterdrückung verfügt. Besonders das Gebiet der Reduzierung der Feuchteabhängigkeit bietet jedoch noch erhebliches Potential zur weiteren Verringerung der Meßunsicherheit.

Da die Temperatur in der Regel die hauptsächliche Störgröße ist, werden große Anstrengungen unternommen, ihre Auswirkungen auf das Meßergebnis zu begrenzen. Die Methoden zur Erzielung eines temperaturunabhängigen Meßgerätes sind sehr vielfältig. Häufig bestehen die Meßwandler von Präzisionsmeßgeräten aus Materialien mit geringem Ausdehnungskoeffizienten beziehungsweise guter Wärmeleitfähigkeit, um mögliche Temperatureffekte von vornherein zu minimieren. Des weiteren werden mechanische und elektrische Baugruppen mit dem Ziel eingesetzt, daß sich gegenläufige Effekte kompensieren.

Präzisionsmeßgeräte diverser Hersteller, beispielsweise Mikro- und Präzisionswaagen der Firma Sartorius, verfügen bereits über komplexe mathematische Temperaturkompensationen. Diese ermitteln die Temperatur des Meßwandlers und korrigieren den temperaturbedingten Anzeigefehler anschließend über einen mathematischen Zusammenhang.

Neben der Temperatur ist die Luftfeuchte eine wesentliche Störgröße. Feuchteefflüsse verfälschen das Meßergebnis zum Teil erheblich.

Die häufig sehr großen Zeitkonstanten, mit denen Feuchteänderungen Meßgeräte beeinflussen, erschweren die Erkennung eines Zusammenhanges von Ursache und Wirkung.

Eine exakte Trennung zwischen Temperatur- und Feuchteeinfluß ist ebenfalls kompliziert. Ändert sich in einem abgeschlossenen Raum die Temperatur, so ändert sich zwangsläufig auch die relative Feuchte. Aufgrund der großen Korrelation zwischen Temperatur und relativer Feuchte ist die tatsächliche Ursache der Beeinflussung des Meßgerätes in diesem Fall nicht eindeutig bestimmbar.

1 Einleitung

In der vorliegenden Arbeit werden die Problematik der Auswirkungen der Luftfeuchte auf Präzisionsmeßgeräte und Vorgehensweisen zur Reduzierung der Feuchteabhängigkeit systematisch dargelegt.

Im Kapitel *Grundlagen zur Feuchte und zum Feuchtetransport* werden verschiedene Darstellungsvarianten der Luftfeuchte angeführt und die mathematischen Beziehungen zwischen diesen erläutert. Weiterhin wird auf Grundlagen des Feuchtetransportes und der Feuchtespeicherung in Feststoffen eingegangen.

Somit bildet dieses Kapitel den Grundstein zum Verständnis der folgenden Ausführungen.

Zur Ermittlung der Feuchteabhängigkeit eines Präzisionsmeßgerätes müssen experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden. Um aus diesen Experimenten statistisch gesicherte Ergebnisse zu erhalten, sollten die im Kapitel *Grundlagen experimenteller Untersuchungen* gegebenen Hinweise zur Versuchsplanung und -durchführung unbedingt Beachtung finden. Ferner werden an dieser Stelle die Grenzen der aktuellen Feuchtesensorik nachgewiesen und verschiedene Möglichkeiten zur Erzeugung definierter Luftfeuchten erläutert.

Das Kapitel *Einfluß der Luftfeuchte auf Präzisionsmeßgeräte* deckt die Ursachen der Feuchteabhängigkeit von Präzisionsmeßgeräten auf. Da die Feuchteabhängigkeit stets auf einem Feuchtetransport basiert, werden die verschiedenen Wege, auf denen der Feuchtetransport zwischen Meßgerät und Umgebung vonstatten geht, gezeigt und modelliert.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf *Methoden zur Reduzierung der Feuchteabhängigkeit von Präzisionsmeßgeräten*. In diesem Kapitel werden drei unterschiedliche Ansätze zur Reduzierung der Feuchteabhängigkeit theoretisch abgehandelt und anhand von experimentellen Untersuchungen verifiziert. Ein bedeutender Aspekt ist hierbei die Analyse der Wechselwirkungen von Feuchte- und Temperaturabhängigkeit.

2 Grundlagen zur Feuchte und zum Feuchtetransport

2.1 Beschreibung des Zustandes der feuchten Luft

In einem abgeschlossenen und homogen temperierten System, bestehend aus Wasser und Luft, stellt sich ein statischer Gleichgewichtszustand zwischen Wasser in der flüssigen (bzw. in der festen) und in der gasförmigen Phase ein. Der bei diesem Zustand vorhandene Wasserdampfdruck wird als *Sättigungsdampfdruck feuchter Luft* p'_S bezeichnet. Die Temperatur von Wasser und Luft entspricht in diesem Fall der *Taupunkttemperatur* (bzw. der Frostpunkttemperatur) ϑ_{Tau} .

Ohne das Vorhandensein von Luft, d. h. bei Wasser in reiner Phase, stellt sich ein geringfügig niedrigerer *Sättigungsdampfdruck* p_S ein. Der Zusammenhang zwischen p_S und p'_S wird durch den f -Faktor in Gleichung (2.1) beschrieben.

$$p'_S = p_S \cdot f(p, \vartheta) \quad (2.1)$$

Unter Vernachlässigung der Temperaturabhängigkeit ergibt sich der f -Faktor zu

$$f(p) \approx 1,0016 + 3,15 \cdot 10^{-6}p - 0,074/p, \text{ mit } p \text{ in hPa.} \quad (2.2)$$

Die Standardabweichung des f -Faktors nach Gleichung (2.2) ist im Bereich von $p = (30 \dots 1100)$ hPa und $\vartheta = (-50 \dots 60)$ °C nach D. Sonntag [28] kleiner als $\pm 0,0004$. Konform zur ITS-90 gibt D. Sonntag in [28] die folgende Größengleichung zur Berechnung des Sättigungsdampfdruckes (in hPa) über Wasser und Eis in Abhängigkeit von der Temperatur an.

$$p_S(\vartheta) = \exp \left(\frac{a_1}{T} + a_2 + a_3 \cdot T + a_4 \cdot T^2 + a_5 \cdot \ln(T) \right), \text{ mit den Koeffizienten} \quad (2.3)$$

<p>–über Wasser: $a_1 = -6,0969385 \cdot 10^3$</p> <p>$a_2 = 1,6635794 \cdot 10^1$</p> <p>$a_3 = -2,711193 \cdot 10^{-2}$</p> <p>$a_4 = 1,673952 \cdot 10^{-5}$</p> <p>$a_5 = 2,433502$</p>	<p>–über Eis: $a_1 = -6,0245282 \cdot 10^3$</p> <p>$a_2 = 2,47219 \cdot 10^1$</p> <p>$a_3 = 1,0613868 \cdot 10^{-2}$</p> <p>$a_4 = -1,3198825 \cdot 10^{-5}$</p> <p>$a_5 = -4,9382577 \cdot 10^{-1}$</p>
--	---

Eine gebräuchliche Vereinfachung von Gleichung (2.3) ist die in Gleichung (2.4) angegebene Magnusformel [28].

$$\ln p_S(\vartheta) = 6,112 + \frac{a \cdot \vartheta}{b + \vartheta}, \text{ mit } p_S \text{ in hPa und den Koeffizienten} \quad (2.4)$$

2 Grundlagen zur Feuchte und zum Feuchtetransport

$$\begin{array}{ll} \text{-über Wasser: } a = 17,62 & \text{-über Eis: } a = 22,46 \\ & b = 243,12 \quad \quad \quad b = 272,62 \end{array}$$

Der nach der Magnusformel berechnete Sättigungsdampfdruck über Wasser weist im Temperaturbereich von $\vartheta = (-45 \dots 60)^\circ\text{C}$ eine relative Unsicherheit von weniger als $\pm 0,3\%$ auf. Die relative Unsicherheit des Sättigungsdampfdruckes über Eis ist im Temperaturbereich von $\vartheta = (-65 \dots 0,01)^\circ\text{C}$ kleiner als $\pm 0,5\%$.

Aus der Magnusformel kann im Unterschied zu Gleichung (2.3) die Taupunkttemperatur explizit ermittelt werden. Über Wasser ergibt sich

$$\vartheta_{Tau} = \frac{243,12 \ln(p_D/6,112)}{17,62 - \ln(p_D/6,112)}, \text{ mit } p_D \text{ in hPa.} \quad (2.5)$$

Im Temperaturbereich von $\vartheta = (-45 \dots 60)^\circ\text{C}$ weist Gleichung (2.5) eine Standardabweichung von weniger als $\pm 0,02\text{ K}$ auf. Die Frostpunkttemperatur kann analog mit den entsprechenden Koeffizienten aus Gleichung (2.4) ermittelt werden.

Unter normalen Klimabedingungen kann Wasserdampf mit ausreichender Genauigkeit als ideales Gas betrachtet werden. Erst bei hohen Temperaturen und Drücken muß man einen sogenannten Kompressionsfaktor berücksichtigen. Für Wasserdampf ergibt sich dieser nach [28] zu

$$Z_D \approx 1 - \exp[0,02735(40 + \vartheta) - 8]. \quad (2.6)$$

Die Zustandsgleichung für ein ideales Gas lautet

$$p \cdot V = n \cdot R_a \cdot T. \quad (2.7)$$

Überführt man die allgemeine Gaskonstante R_a durch Division mit der molaren Masse des Gases in die spezielle Gaskonstante R_s und ersetzt die Anzahl der Mole n durch das Verhältnis aus Masse zu molarer Masse, so erhält man die gasspezifische Zustandsgleichung

$$p \cdot V = m \cdot R_s \cdot T. \quad (2.8)$$

Die Auflösung von Gleichung (2.8) nach dem Verhältnis von Masse zu Volumen liefert den Zusammenhang zwischen *absoluter Feuchte* bzw. *Konzentration* c , Temperatur und Druck. Die Wasserdampfkonzentration in Luft ergibt sich unter Berücksichtigung des Kompressionsfaktors zu

$$c = \frac{p'_D}{Z_D \cdot R_D \cdot T}, \quad (2.9)$$

wobei p'_D den Wasserdampfdruck in Luft darstellt.

Die *spezielle Gaskonstante für Wasserdampf* wird mit R_D bezeichnet und beträgt $R_D = (461,525 \pm 0,013) \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ [28].

Da die Darstellungsvarianten der Luftfeuchte als Dampfdruck, Taupunkttemperatur und Konzentration für den Menschen schwer relativierbar sind, wurde die *relative Luftfeuchte* φ eingeführt. Diese ergibt sich als prozentuales Verhältnis aus dem vorhandenen Dampfdruck und dem Sättigungsdampfdruck in Luft zu

$$\varphi = \frac{p'_D}{p'_S} \cdot 100 \% \text{ r. F.} \quad (2.10)$$

Auch aus physikalischen Gesichtspunkten ist die relative Feuchte eine zweckmäßige Größe, da viele Sorptionsprozesse in gewissen Grenzen proportional zur relativen Feuchte verlaufen. Dieser Umstand ermöglicht die direkte Messung der relativen Feuchte.

2.2 Mathematische Beschreibung von Diffusionsvorgängen

Diffusion ist ein Prozeß, bei dem Materie durch zufällige Molekularbewegungen von einem Ort höherer Konzentration zu einem Ort niedriger Konzentration transportiert wird. Sie vollzieht sich ohne Wirkung äußerer Einflüsse.

1855 entdeckte Fick die in Gleichung (2.11) angegebene Proportionalität zwischen dem *örtlichen Konzentrationsgradienten* $\partial c/\partial x$ und dem daraus resultierenden *Massenstrom* \dot{m} . D ist hierbei der stoffspezifische *Diffusionskoeffizient* und A die Fläche, durch die der Diffusionsprozeß stattfindet.

Das negative Vorzeichen in Gleichung (2.11) ergibt sich, da der Massenstrom entgegengesetzt zum Konzentrationsgradienten verläuft [6].

$$\dot{m} = -D \frac{\partial c}{\partial x} A \quad (2.11)$$

In Analogie zur Fourier'schen Gleichung der Wärmeleitung läßt sich die zeitliche und örtliche Verteilung der Konzentration nach Gleichung (2.12) beschreiben [6].

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2.12)$$

Die Gleichungen (2.11) und (2.12) werden als das erste und zweite Fick'sche Gesetz der Diffusion bezeichnet.

Der Diffusionskoeffizient von Wasserdampf in Luft ist sowohl von der Temperatur als auch vom Druck abhängig. Dieser Zusammenhang wurde von Schirmer untersucht und kann durch die Schirmer'sche Größengleichung (2.13) beschrieben werden [2].

$$D_{\text{Wasserdampf, Luft}} = 0,083 \frac{p_0}{p} \left(\frac{T}{273 \text{ K}} \right)^{1,81} \quad (2.13)$$

mit: $D_{\text{Wasserdampf, Luft}}$ in m^2/h , p in hPa, p_0 in hPa und T in K

In einigen Polymeren hängt der Diffusionskoeffizient von Wasserdampf (im Unterschied zum Diffusionskoeffizienten in Luft) auch von der Konzentration ab.

2.3 Feuchtetransport in porösen Feststoffen

Als Feststoffe werden hier allgemein Materialien bezeichnet, in die aufgrund ihres porösen Aufbaus Wasserdampf eindringen kann.

2 Grundlagen zur Feuchte und zum Feuchtetransport

Der Gesamtfeuchtetransport im Feststoff setzt sich aus dem Transport in der sorbierten Phase und dem Transport in der Gasphase zusammen. Beim Transport in der Gasphase wird zwischen Normaldiffusion und Knudsen'scher Molekularbewegung unterschieden. Knudsen'sche Molekularbewegung liegt dann vor, wenn die freie Weglänge eines Wassermoleküls größer als der Porendurchmesser des Feststoffes ist. Die freie Weglänge bezeichnet die mittlere Strecke, die ein Wassermolekül bis zum Zusammenstoß mit anderen Wassermolekülen zurücklegt [2]. Das Verhältnis der Masse des vom Feststoff aufgenommenen Wassers bzw. Wasserdampfes bezüglich der Masse des trockenen Feststoffes wird als *Beladung* X bezeichnet. Analytisch notiert, ergibt sich die Beladung zu

$$X(\varphi) = \frac{m(\varphi) - m(0 \% r.F.)}{m(0 \% r.F.)}. \quad (2.14)$$

In Abbildung 2.1 ist der örtliche Beladungsverlauf eines kugelförmigen Feststoffes mit dem Radius r_B zu verschiedenen Zeitpunkten in radialer Richtung qualitativ dargestellt. Dabei wird davon ausgegangen, daß sich die relative Feuchte zum Zeitpunkt $t = 0$ sprunghaft ändert und die Temperatur der Umgebung konstant ist. Während der Zeit $t < 0$ bestand ein Gleichgewichtszustand zwischen der Beladung des Feststoffes und der Konzentration der Umgebung. Der Feststoff war hierbei homogen auf den Wert X_0 beladen $X(t < 0) = X_0$. Unmittelbar nach der sprunghaften Änderung der Umgebungsfeuchte erreicht die Beladung des äußeren Randes des Feststoffes bereits ihren statischen Endwert. Im Inneren des Feststoffes geht der Ausgleichsprozeß jedoch nur langsam vonstatten.

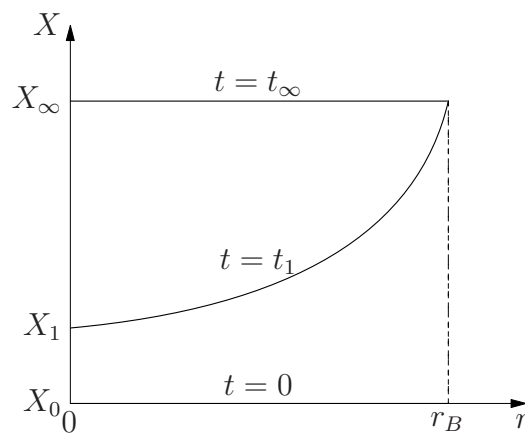


Abbildung 2.1: Örtlicher Beladungsverlauf eines kugelförmigen Feststoffes zu verschiedenen Zeiten in radialer Richtung

Die analytische Beschreibung des Feuchtetransportes im Feststoff erfolgt wiederum mit Hilfe der Fick'schen Gesetze. In Analogie zu Gleichung (2.11) gilt für den Feuchtetransport in der Gasphase

$$\dot{m} = -D \frac{\partial c}{\partial r} A_P, \quad (2.15)$$

wobei A_P die effektiv wirksame Porenfläche des Feststoffes darstellt. Diese ergibt sich aus dem in Gleichung (2.16) angegebenen Zusammenhang zwischen der Gesamtfläche A und

der Porosität ψ [15].

$$A_P = \psi \cdot A \quad (2.16)$$

In Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchte lagert sich eine bestimmte Anzahl von Wassermolekülen an den Porenwänden des Feststoffes an. Bei dieser Absorption von Wasserdampf am Feststoff wird Absorptionswärme freigesetzt, woraus eine Temperaturerhöhung im Feststoff resultiert. Das Wasserdampfspeichervermögen von Feststoffen sinkt mit steigender Temperatur. Somit wird der Feuchteausgleich durch die absorptionsbedingte Temperaturerhöhung verlangsamt. Ein statisches Konzentrationsgleichgewicht wird erst nach vollendetem Temperatúrausgleich erreicht. Diese Zusammenhänge sind in den Abbildungen 2.2 und 2.3 dargestellt und gelten wiederum für eine sprunghafte Änderung der Umgebungsfeuchte zum Zeitpunkt $t = 0$.

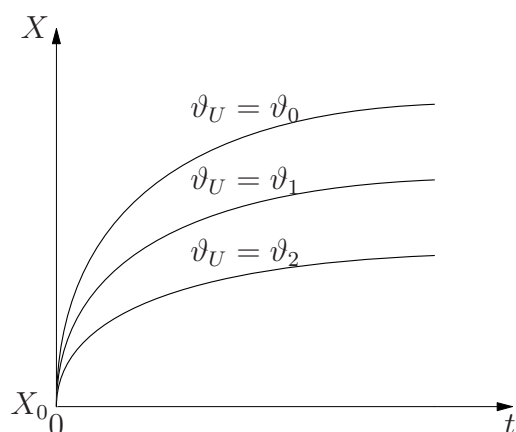


Abbildung 2.2:
Zeitlicher Beladungsverlauf eines Feststoffes bei verschiedenen Temperaturen ($v_0 < v_1 < v_2$)

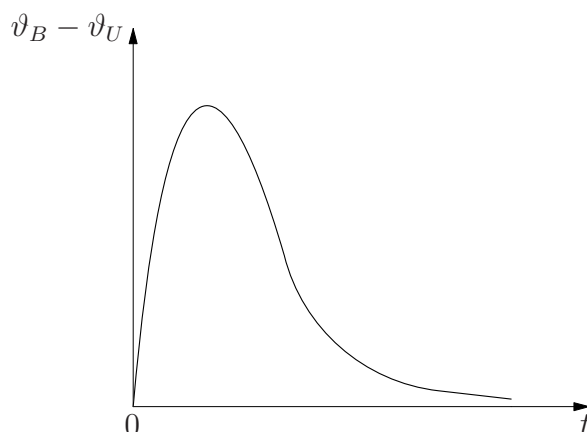


Abbildung 2.3:
Sorptionswärmebedingte Temperaturdifferenz zwischen Feststoff und Umgebung

Korrekterweise muß demnach der Feuchte- und der Wärmetransport als ein zusammenhängender Prozeß betrachtet werden.

Bei kleinen Feuchteänderungen ist der Fehler, der aus der Annahme eines isothermen Sorptionsvorganges resultiert, jedoch für die meisten praktischen Anwendungsfälle vernachlässigbar.

Der Zusammenhang zwischen der relativen Luftfeuchte und der sich im Feststoff einstellenden Gleichgewichtsbeladung wird durch die *Sorptionsisothermen* beschrieben. Im Abschnitt 2.4 werden gebräuchliche Varianten zur analytischen Beschreibung des Sorptionsgleichgewichtes angegeben.

Für einen kugelförmigen Feststoff ergibt sich die örtliche und zeitliche Beladung zu

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(D^* \cdot r^2 \cdot \frac{\partial X}{\partial r} \right). \quad (2.17)$$

2 Grundlagen zur Feuchte und zum Feuchtetransport

Diese Gleichung gilt unter der Annahme einer linearen Sorptionsisotherme und isothermer Absorption. D^* ist der effektive Diffusionskoeffizient, der sowohl den Transport in der Gasphase als auch den Transport in der sorbierten Phase berücksichtigt.

Mit Gleichung (2.18) gab Crank [6] eine allgemeine Lösung der partiellen Differentialgleichung (2.17) an, die unter der Voraussetzung eines konstanten effektiven Diffusionskoeffizienten gültig ist.

$$\frac{X - X_0}{X_\infty - X_0} = \frac{r_B}{r} \sum_{i=0}^{\infty} \left[\operatorname{erfc} \frac{(2i+1)r_B - r}{2\sqrt{D^* \cdot t}} - \operatorname{erfc} \frac{(2i+1)r_B + r}{2\sqrt{D^* \cdot t}} \right] \quad (2.18)$$

Da in dieser Arbeit weniger die örtliche Konzentrationsverteilung im Feststoff, als vielmehr die tatsächlich aufgenommene Menge an Wasserdampf von Interesse ist, genügt es, eine ortsunabhängige Lösung von Gleichung (2.17) zu finden. Die Berechnungsgleichung (2.19) für die sogenannte mittlere Beladung $\bar{X}(t)$ erhält man durch Integration von Gleichung (2.18) über das Volumen des Feststoffes [5, S. 7].

$$\frac{\bar{X} - X_0}{X_\infty - X_0} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i^2} \exp \left(-i^2 \cdot \pi^2 \cdot D^* \frac{t}{r_B^2} \right) \quad (2.19)$$

Von Crank werden für Gleichung (2.19) zwei Näherungslösungen angegeben, wobei Gleichung (2.20) für kurze Zeiten und Gleichung (2.21) für lange Zeiten gilt.

$$\frac{\bar{X} - X_0}{X_\infty - X_0} = \frac{6}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{D^* \cdot t}{r_B^2}} - 3 \frac{D^* \cdot t}{r_B^2} \quad (2.20)$$

$$\frac{\bar{X} - X_0}{X_\infty - X_0} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \exp \left(-\pi^2 \cdot D^* \frac{t}{r_B^2} \right) \quad (2.21)$$

In Abbildung 2.4 sind die nach den verschiedenen Gleichungen errechneten mittleren zeitlichen Beladungsverläufe graphisch dargestellt. Als Feststoffparameter (D^* , r_B) fanden hierbei die von Jokisch [15] angegebenen Werte für Silikagel¹ Verwendung.

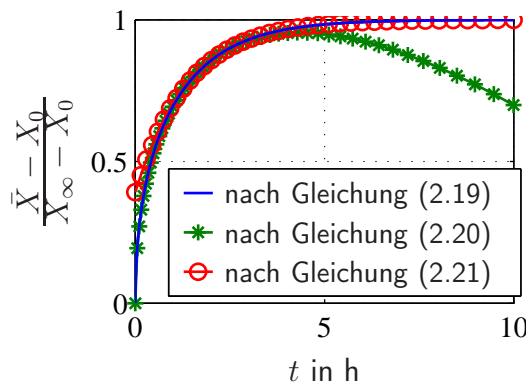


Abbildung 2.4: Vergleich der berechneten normierten mittleren Beladungsverläufe nach Gleichung (2.19), (2.20) und (2.21) anhand der Parameter von Silikagel $D^* = 4,58 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{h}$ und $r_B = 2,5 \text{ mm}$

¹Eigenschaften und technische Parameter von Silikagel sind im Abschnitt 5.1.4 angegeben

Der große Vorteil der beiden Nährlösungen ist, daß sie explizit nach D^* aufgelöst werden können, wodurch aus experimentellen Untersuchungen der effektive Diffusionskoeffizient ermittelt werden kann.

2.4 Analytische Darstellung des Sorptionsgleichgewichtes

Wie bereits erwähnt, kann das stationäre Feuchtespeichervermögen von Feststoffen mit Hilfe von Sorptionsisothermen beschrieben werden. Zur analytischen Darstellung der Sorptionsisothermen sind verschiedene Varianten bekannt. Im folgenden wird auf drei Varianten, die auf physikalischen Grundlagen basieren, näher eingegangen.

In den betrachteten Sorptionsisothermengleichungen findet der temperaturabhängige Parameter a Verwendung. Dieser ergibt sich zu

$$a(T) = a_0 \exp \left(\frac{h}{R_D T} \right), \quad (2.22)$$

wobei h die Bindungsenthalpie der ersten absorbierten Schicht angibt [15]. Die Temperaturabhängigkeit des Parameters a beschreibt die Temperaturabhängigkeit des Sorptionsgleichgewichtes. Busweiler fand empirisch heraus, daß die gemessene Temperaturabhängigkeit des Sorptionsgleichgewichtes bei Silikagel besser mit den angegebenen Gleichungen übereinstimmt, wenn die Bedingung

$$\frac{X_m}{a} = \text{konst.} \quad (2.23)$$

eingehalten wird [5]. X_m steht für den Wert der Beladung, bei dem sich genau eine Schicht Wassermoleküle an der Oberfläche des Feststoffes angelagert hat und wird als monomolekulare Beladung bezeichnet.

2.4.1 Sorptionsisotherme nach Langmuir

Eine einfache Variante zur Darstellung der Sorptionsisothermen ist die Langmuir-Gleichung (2.24) [10]. Sie ist aus der kinetischen Betrachtung des Absorptionsvorgangs unter Voraussetzungen, wie z. B. einer gleichmäßigen Verteilung der Absorptionsplätze, konstanter Absorptionswärme und einer monomolekularen Beladung abgeleitet.

$$X = X_m \frac{a \cdot \varphi}{1 + a \cdot \varphi} \quad (2.24)$$

2.4.2 BET-Sorptionsisothermengleichung

Die Abkürzung BET benennt die Erfinder Brunauer, Emmet und Teller dieser Sorptionsisothermengleichung. Sie ist eine Erweiterung der Langmuir-Gleichung für polymolekulare Beladung und lautet

$$X = X_m \frac{a \cdot \varphi}{1 - \varphi} \cdot \frac{1 - (n+1)\varphi^n + n \cdot \varphi^{n+1}}{1 + (a-1)\varphi - a \cdot \varphi^{n+1}}, \quad (2.25)$$

2 Grundlagen zur Feuchte und zum Feuchtetransport

wobei n die Anzahl der angelagerten Schichten angibt [15]. Für $n = 1$ resultiert aus Gleichung (2.25) die Langmuir-Sorptionsisothermengleichung.

Für eine Oberfläche, an der sich unendlich viele Schichten anlagern können ($n = \infty$), ergibt sich folgende Vereinfachung [5]

$$X = X_m \frac{a \cdot \varphi}{(1 - \varphi) \cdot [1 + \varphi(a - 1)]}. \quad (2.26)$$

Wurde die Beladung eines Feststoffes experimentell bestimmt, so lassen sich die monomolekulare Beladung X_m und der Parameter a aus der in Gleichung (2.27) angegebenen linearisierten Form von Gleichung (2.26), beispielsweise durch lineare Regression, ermitteln [5].

$$\frac{\varphi}{X(1 - \varphi)} = \frac{1}{X_m \cdot a} + \frac{a - 1}{X_m \cdot a} \varphi \quad (2.27)$$

Aus der Kenntnis der monomolekularen Beladung und des Platzbedarfs eines Sorbatmoleküls kann die innere Oberfläche des Sorbenten berechnet werden.

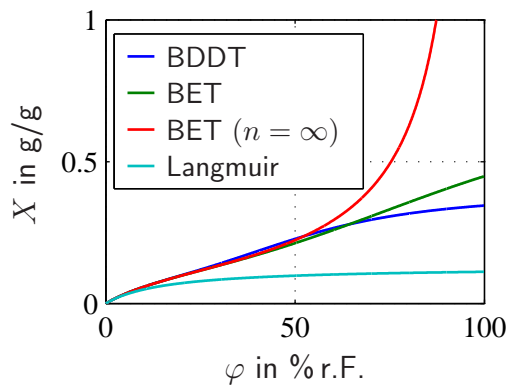
2.4.3 BDDT-Sorptionsisotherme

Die BDDT-Sorptionsisotherme (Brunauer, Deming, Deming, Teller) ist in Gleichung (2.28) angegeben. Oberhalb von 40 % r. F. tritt bei vielen Sorptionsprozessen zusätzlich zur Adsorption noch Kapillarkondensation in den Poren auf. Durch diese wird die effektive Oberfläche des Sorbenten verringert. Berücksichtigung findet die Kapillarkondensation in Gleichung (2.28) durch Einführung des Parameters b [5]. Dieser Parameter ist ein Maß für die Verringerung der inneren Oberfläche des Sorbenten und ist im allgemeinen selbst eine Funktion von der relativen Feuchte.

$$X = X_m \left[\frac{\varphi}{1 - \varphi} + \frac{2(a - 1)\varphi + 2(a - 1)^2\varphi^2 + (na^2 + nb - 2na - n^2a^2)\varphi^n}{2[1 + 2(a - 1)\varphi + (a - 1)^2\varphi^2 + (a^2 + b - 2a - na^2)\varphi^n] \dots} \dots \right. \\ \left. \dots \frac{+(2a + n^2a^2 + 2na - 2a^2 - na^2 - 2b - 2nb)\varphi^{n+1} + (nb + 2b)\varphi^{n+2}}{+ (na^2 + 2a - 2a^2 - 2b)\varphi^{n+1} + b\varphi^{n+2}} \right] \quad (2.28)$$

2.4.4 Gültigkeitsbereich der Sorptionsisothermengleichungen

Zur Ermittlung des Gültigkeitsbereiches der angeführten Sorptionsisothermengleichungen wurde ein Rechenbeispiel durchgeführt. Mit den von Busweiler [5] angegebenen Parametern für Silikagel WS wurde nach den Gleichungen (2.24), (2.25), (2.26) und (2.28) die jeweilige feuchteabhängige Beladung bei einer Temperatur von $\vartheta = 25^\circ\text{C}$ errechnet. In Abbildung 2.5 sind die Berechnungsergebnisse der verschiedenen Sorptionsisothermengleichungen gemeinsam dargestellt.



Zur Berechnung verwendete Parameter:

$$a = 6,1506$$

$$b = 825$$

$$n = 6,1$$

$$X_m = 0,1298 \text{ g/g}$$

Abbildung 2.5: Vergleich der mit verschiedenen Sorptionsisothermengleichungen errechneten Beladungsverläufe für Silikagel WS

Die von Busweiler durchgeführten Untersuchungen zeigen, daß die mit obigem Parametersatz errechnete BDDT-Sorptionsisotherme (blaue Kurve in Abbildung 2.5) das experimentell ermittelte Sorptionsverhalten von Silikagel sehr gut widerspiegelt.

Unter Verwendung der BET-Sorptionsisothermengleichung werden bei Feuchten oberhalb von 50 % r.F. zu große Beladungen errechnet. Dieses Verhalten resultiert aus der bei hohen Feuchten einsetzenden Kapillarkondensation im Silikagel, die durch die BET-Gleichung nicht berücksichtigt wird.

Da die Langmuir-Gleichung nur die monomolekulare Beladung einbezieht, sind die mit ihr errechneten Beladungen für Feuchten oberhalb von 10 % r.F. deutlich zu gering.

In Tabelle 2.1 sind die Feuchtebereiche angegeben, in denen die Beladungsabweichung der verschiedenen Sorptionsisothermen bezüglich der BDDT-Sorptionsisotherme kleiner als 10 % ist.

Langmuir	(0 ... 6) % r.F.
BET ($n = \infty$)	(0 ... 60) % r.F.
BET	(0 ... 77) % r.F.

Tabelle 2.1: Feuchtebereiche für eine Beladungsabweichung kleiner 10 % bezüglich der BDDT-Sorptionsisotherme

3 Grundlagen experimenteller Untersuchungen

3.1 Voraussetzungen zur Durchführung von Feuchteuntersuchungen an Präzisionsmeßgeräten

Um das Feuchteverhalten von Meßgeräten zielgerichtet zu untersuchen, muß man die Meßgeräte einem definierten Klimaverlauf aussetzen und ihre Reaktion darauf beobachten. Dazu benötigt man einen Prüfraum, in dem sowohl die Feuchte als auch die Temperatur determiniert geregelt werden können. Wünschenswert wäre eine zusätzliche Regelung des Luftdrucks. Diese ist jedoch mit erheblichen Mehrkosten verbunden. Da die natürlichen Luftdruckschwankungen in der Regel unkorreliert zum vorgegebenen Feuchte- und Temperaturverlauf bei der experimentellen Untersuchung sind, läßt sich der Einfluß auf die Anzeige des untersuchten Meßgerätes korrekt bestimmen. Demnach genügt es, die Experimente unter Umgebungsdruck durchzuführen und den Verlauf des Luftdrucks zur jeweiligen Messung zu protokollieren.

Bei der Untersuchung von Präzisionsmeßgeräten in einer Klimaprüfkammer ist zu klären, ob die normale Funktion der Klimaprüfkammer das Meßgerät in irgendeiner Art und Weise beeinträchtigt. Mögliche Störquellen können

- mechanische Schwingungen,
- Luftströmungen und
- elektrische und magnetische Felder in der Klimaprüfkammer

sein. Die Auswirkungen von mechanischen Schwingungen, die z. B. aus dem Schalten von Magnetventilen, Schützen und Kühlaggregaten und aus dem Betrieb von Ventilatoren resultieren können, lassen sich durch eine mechanische Trennung von Meßtisch und Klimaprüfkammer reduzieren. Dieses Prinzip ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Hierbei ist zu beachten, daß durch den Meßtisch eine zusätzliche thermische Kapazität in den Nutzraum der Klimaprüfkammer eingebracht wird. Dadurch kann bei Temperaturänderungen ein Gradient zwischen der Temperatur des Meßtisches und der Lufttemperatur im Nutzraum entstehen. Durch eine geeignete Isolation des Stativs kann der Wärmeaustausch zwischen Nutzraum und Umgebung verringert werden.

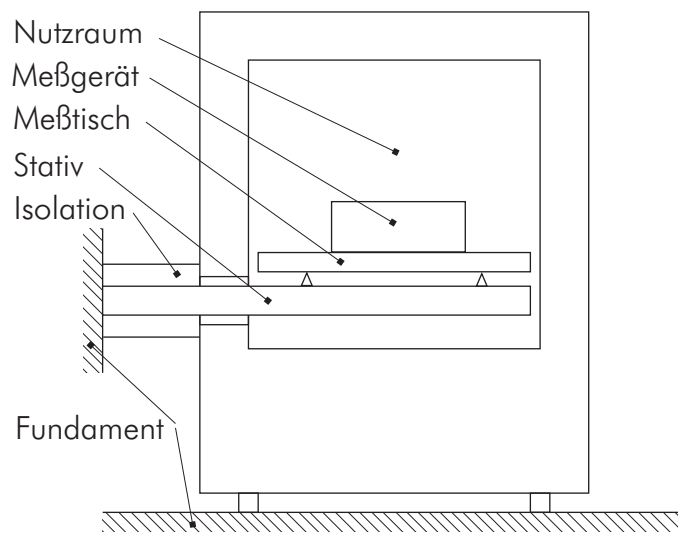


Abbildung 3.1: Mechanische Entkopplung von Klimaprüfkammer und Meßtisch zur Reduzierung der Schwingungsübertragung auf das zu untersuchende Meßgerät (Prüfling)

Wirkt sich der zur Klimatisierung zwangsläufig benötigte Luftstrom auf das Meßgerät aus, so ist eine Drehzahlsteuerung des entsprechenden Lüfters (bzw. der Pumpe) der Klimaprüfkammer denkbar. Unter Umständen müssen die Regelparameter der Klimaprüfkammer bei geringeren Luftströmungen angepaßt werden. Untersucht man ein Meßgerät bei verschiedenen Luftströmungen, so ist eine Extrapolation auf das Verhalten ohne Luftströmung möglich.

Eine Reduzierung elektrischer Felder kann durch entsprechende Abschirmung erfolgen. Magnetische Felder lassen sich hingegen nur schwer verringern.

Da die Auswirkungen der Luftfeuchte auf Meßgeräte zumeist mit großen Zeitkonstanten (in der Größenordnung von Stunden bis Tagen) verbunden sind, empfiehlt sich die Pufferung der Versorgungsspannung von Prüfling und benötigter Meßtechnik durch eine unterbrechungsfreie Stromversorgung.

Weiterhin ist eine rechnergestützte Meßwertaufnahme und -verarbeitung, bedingt durch die langen Meßzeiten, nahezu unumgänglich. Hierzu bietet das Programmsystem *MATLAB* ideale Voraussetzungen. Neben allen erdenklichen mathematischen matrixorientierten Operationen wird über die *Instrument Control Toolbox* die Verbindung zu Meßgeräten mit verschiedenen Schnittstellen (Serial, GPIB, TCPIP, USB und weiteren) möglich. Mit Hilfe der *DAQ Toolbox* können analoge und digitale Eingabe- und Ausgabekarten verschiedener Hersteller angesprochen werden. Ebenso wird hierdurch die Kommunikation über die parallele Schnittstelle des Rechners ermöglicht. Durch die hohe Integration der zur Verfügung stehenden Funktionen und durch die gute Modularisierbarkeit von Programmteilen ist eine Adaption an ständig wechselnde Meß- und Steueraufgaben problemlos möglich.

Da die Feuchteeffekte von Meßgeräten und deren Einzelbauteilen unter Umständen sehr

3 Grundlagen experimenteller Untersuchungen

klein sein können, werden hohe Anforderungen an die zum Nachweis dieser Effekte eingesetzte Sensorik und Meßtechnik gestellt. Erreichbare Genauigkeiten und Auflösungen müssen vorab geklärt werden.

Um Aussagen über das Feuchteverhalten von bestimmten Baugruppen eines Meßgerätes treffen zu können, ist es notwendig, die Feuchte und die Temperatur in unmittelbarer Nähe dieser Baugruppen zu messen. D. h., daß man mindestens einen Feuchtefühler in das zu untersuchende Meßgerät einbauen muß. Auch für eine mathematische Kompensation des Feuchteverhaltens (Abschnitt 5.3) und zur Analyse des Feuchtetransportes zwischen der Umgebungsluft und der Gehäuseluft des Meßgerätes (Abschnitt 4.2) ist eine Feuchtemeßstelle im Meßgerät unumgänglich.

Bei der Auswahl der zum Einbau vorgesehenen Feuchtefühler sollte man darauf achten, daß das Meßgerät durch den Fühler möglichst wenig beeinflusst wird. Er sollte also möglichst klein ausfallen und eine geringe Leistungsaufnahme haben, um das Temperaturfeld des Meßgerätes nicht zu verändern und um keine zusätzlichen Luftströmungen hervorzurufen.

3.2 Vergleich meßtechnischer Eigenschaften verschiedener Feuchtesensoren

Zum Nachweis der realen meßtechnischen Eigenschaften kommerziell erhältlicher Feuchtesensoren wurde eine Vergleichsmessung durchgeführt. Hierbei wurde eine Auswahl von Produkten verschiedener Hersteller gegen Referenzfühler kalibriert. Die untersuchten Feuchtefühler befanden sich in unmittelbarer Nähe zueinander im Zentrum des Prüfraumes einer Klimaprüfkammer. In Tabelle 3.1 ist der zeitliche Sollklimaverlauf während der Messung angegeben.

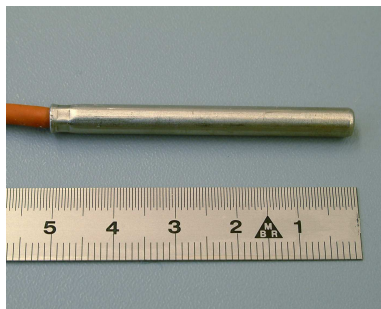
Nr.	t in h	φ in % r.F.	ϑ in °C
1	6	50	25
2	6	40	20
3	6	60	20
4	6	80	20
5	6	40	30
6	6	60	30
7	6	80	30
8	6	50	25

Tabelle 3.1: Sollwerte der relativen Feuchte und der Temperatur in der Klimaprüfkammer

Jeder Klimawert wurde über eine Zeit von sechs Stunden konstant gehalten. Durch die beiden gleichen Klimapunkte Nr. 1 und Nr. 8 kann eine mögliche Drift der Feuchtesensoren festgestellt werden. Die Strömungsgeschwindigkeit der Luft in der Klimaprüfkammer war während der Messung kleiner als 1 m/s.

Im folgenden sind neben grundlegenden Herstellerangaben zu den untersuchten Feuchte- und Temperatursensoren auch Anmerkungen zu der jeweiligen Meßkonfiguration zusammengefaßt.

- **Electrotherm Pt 100 Typ K1**



Zur Referenztemperaturmessung kam ein Pt 100 Kabelfühler der Firma Electrotherm zum Einsatz. Dieser wurde von dem Deutschen Kalibrierdienst (DKD) mit einer Unsicherheit von 0,02 K (erweiterte Meßunsicherheit für $k = 2$) im Bereich zwischen (0...100) °C mit einem Meßstrom von 1 mA kalibriert.

Bei der Untersuchung der Feuchtefühler wurde der Widerstand des Pt 100 mit einem Multimeter vom Typ Agilent 3458 A in Vierleiterschaltung offsetkompensiert und mit einer Integrationszeit von 1 s gemessen. Der Meßstrom be-

trug hierbei ebenfalls 1 mA.

Die Temperatur wurde durch Umstellung der Platin-Temperatur-Widerstandskennlinie $R = R_0(1 + \alpha \cdot \vartheta + \beta \cdot \vartheta^2)$ ermittelt, wobei die Parameter R_0 , α und β mittels Regression aus den Kalibrierwerten geschätzt wurden.

Hierbei ergibt sich eine maximale Abweichung zwischen den Kalibrierwerten und der Regressionskurve von 6 mK, d. h. der Regressionsfehler ist deutlich kleiner als die Unsicherheit der Kalibrierung.

- **Walz Dewpoint System TS-2**



Als Referenzfeuchtemeßgerät wurde ein nach dem Prinzip der optischen Taupunktdetektion arbeitendes Tauspiegelhygrometer der Firma Walz verwendet. Die Taupunkttemperatur kann wahlweise über einen digitalen oder einen analogen Ausgang abgefragt werden. Bei dieser Untersuchung kam der analoge Ausgang durch eine Spannungsmessung mittels Agilent 3458 A mit einer Integrationszeit von 1 s zum Einsatz.

Das Tauspiegelhygrometer wurde von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) mit einer Unsicherheit der Taupunkttemperatur (erweiterte Meßunsicherheit, $k = 2$) von 0,05 K kalibriert. Unter Berücksichtigung der im vorigen Punkt angegebenen Unsicherheit der Temperaturmessung von 0,02 K ergibt sich im untersuchten Klimabereich eine maximale Unsicherheit der relativen Feuchte von 0,35 % r.F.

3 Grundlagen experimenteller Untersuchungen

- Rotronic SA 200 C-110, und SA 100 C-100



Die untersuchten kombinierten Feuchte- und Temperatursensoren von der Firma Rotronic sind bereits seit mehreren Jahren zuverlässig im Laboreinsatz. Aktuell sind diese Modelle nicht mehr im Handel erhältlich.

Die Feuchteunsicherheit spezifiziert Rotronic für diese kapazitiven Feuchtesensoren mit 1 % r.F. bei einer Temperatur von 25°C. Die Unsicherheit der Temperaturmessung ist geringer als 0,5 K.

Beide Rotronic-Sensoren besitzen einen zur relativen Feuchte und einen zur Temperatur proportionalen Spannungsausgang. Diese Spannungen wurden bei der Untersuchung mittels Agilent 3458 A Multimeter mit einer Integrationszeit von 1 s gemessen.

- Hy-Cal IH 3602 C

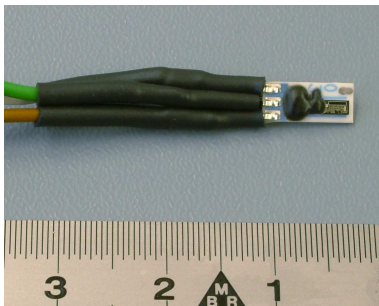


Von der Firma Honeywell werden zwei verschiedene Varianten von kombinierten Miniaturfeuchte- und -temperatursensoren angeboten. Im Gegensatz zur thermistorgestützten Temperaturmessung im IH 3602 A wird beim IH 3602 C ein Pt 1000 zur Temperaturmessung eingesetzt. Die Unsicherheit der relativen Feuchte beträgt im Bereich von (0...100) % r.F. bei 25°C, laut Hersteller, 2 % r.F. Für die Temperaturmessung wird beim IH 3602 C eine Unsicherheit von 0,5 K angegeben. Die Feuchtedetektion basiert auf einem kapazitiven Meßprinzip, wobei durch die integrierte

Analogelektronik eine feuchteproportionale Ausgangsspannung zur Verfügung steht.

Bei der Untersuchung der Feuchtefühler wurde der Widerstand des Pt1000 und die Ausgangsspannung mit einem Multimeter vom Typ Agilent 3458 A mit einer Integrationszeit von 1 s gemessen.

- Hy-Cal IH 3605



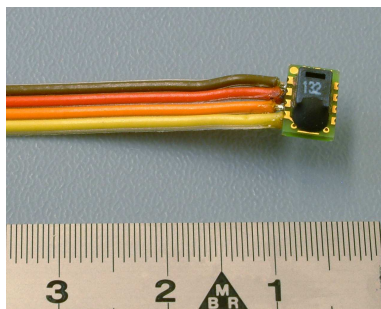
Die Feuchtesensoren vom Typ Hy-Cal IH 3605 arbeiten nach dem gleichen kapazitiven Meßprinzip wie die im vorigen Punkt genannten IH 3602. Sie besitzen im Gegensatz zu diesen jedoch keinen Temperatursensor. Als Flachmeßvariante sind sie wegen ihrer geringen Größe sehr gut für den Einbau in Geräte geeignet. Die Verlustleistung ist sehr gering und beträgt typisch 1 mW.

Bei den hier untersuchten Sensoren handelt es sich um Exemplare ohne Herstellerkalibrierschein. Die Berechnung der relativen Feuchte aus der Ausgangsspannung der Sensoren

erfolgte mit den allgemein gültigen Parametern des Herstellers. Dieser gibt für die Unsicherheit der Feuchtemessung den gleichen Wert wie beim Typ IH 3602 C von 2 % r.F. an. Wahrscheinlich bezieht sich diese Angabe auf die kalibrierte Variante, da die Unsicherheit der Austauschbarkeit der Sensoren 5 % r.F. beträgt.

Bei der durchgeführten Untersuchung der Feuchtefühler wurde die Ausgangsspannung mit einem Multimeter vom Typ Agilent 3458 A mit einer Integrationszeit von 1 s gemessen.

• Sensirion SHT 11



Die Firma Sensirion bietet ebenfalls kombinierte Miniaturfeuchte- und -temperatursensoren an. Ihre Besonderheit ist das digitale Interface. Sowohl Temperatur als auch relative Feuchte können direkt vom Sensor abgefragt werden. Somit eignen sie sich hervorragend für den Einbau in Präzisionsmeßgeräte, die über einen Mikroprozessor verfügen.

Bei dieser Messung wurden Sensoren vom Typ SHT 11 untersucht. Die Unsicherheit der relativen Feuchte wird im Meßbereich von (30...70) % r.F. für diese mit 3,5 % r.F. spezifiziert. Die Unsicherheit der Temperaturmessung beträgt nach Herstellerangaben bei 25 °C 0,5 K. Weiterhin besitzen die Sensoren eine sehr geringe Ansprechzeit von weniger als 4 s. Die Verlustleistung hat einen typischen Wert von 30 μ W. Die Feuchtemessung beruht auf einem kapazitiven Meßprinzip.

3.2.1 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

Aus den Meßwerten der Taupunkttemperatur des Walz-Tauspiegels und der Temperatur des Electrotherm-Platinmeßwiderstandes wurde die Referenzfeuchte errechnet. In den Tabellen 3.2, 3.3 und 3.4 sind die statischen Abweichungen der verschiedenen Feuchtesensoren bezüglich der Feuchte- bzw. Temperaturreferenz bei den Sollklimawerten dargestellt. Die hierbei ermittelten Abweichungen von den Referenzwerten sind teilweise erheblich größer als die Herstellerangaben.

• Rotronic SA 200 C-110, bzw. SA 100 C-100

Die beiden untersuchten Rotronic-Fühler messen die Feuchte im Mittel um 2,7 % r.F. (SA 200 C-110) bzw. 4,9 % r.F. (SA 100 C-100) niedriger als das Tauspiegelhygrometer. Diese Abweichung ist jedoch im wesentlichen ein Offsetunterschied, da sie sich bei allen eingestellten Klimawerten nur geringfügig ändert. Die Standardabweichung des Feuchteunterschiedes beträgt bei beiden Fühlern lediglich circa 0,5 % r.F. Auffällig ist beim SA 100 C-100 ein großer Offsetfehler von -2,4 K in der Temperaturmessung.

3 Grundlagen experimenteller Untersuchungen

Sollfeuchte	in %	50,0	40,0	60,0	80,0	40,0	60,0	80,0	50,0
Solltemperatur	in °C	25,0	20,0	20,0	20,0	30,0	30,0	30,0	25,0
$\Delta\varphi_{SA\ 200\ C-110}$	in %	-2,5	-2,5	-2,0	-2,5	-3,1	-3,0	-3,7	-2,4
$\Delta\varphi_{SA\ 100\ C-100}$	in %	-4,7	-5,2	-5,3	-5,7	-4,3	-4,4	-4,9	-4,4
$\Delta\varphi_{IH\ 3602\ C\ (1)}$	in %	0,9	2,9	1,4	0,6	1,4	-0,6	-2,0	1,7
$\Delta\varphi_{IH\ 3602\ C\ (2)}$	in %	-1,0	0,9	-0,7	-1,7	-0,6	-2,8	-4,6	-0,4
$\Delta\varphi_{IH\ 3605\ (1)}$	in %	14,2	15,9	14,5	44,9	30,7	43,0	45,2	46,7
$\Delta\varphi_{IH\ 3605\ (2)}$	in %	13,7	15,5	14,0	12,9	14,5	12,5	11,0	15,6
$\Delta\varphi_{SHT\ 11\ (1)}$	in %	-7,2	-4,5	-8,2	-11,4	-5,6	-9,7	-13,6	-6,5
$\Delta\varphi_{SHT\ 11\ (2)}$	in %	-6,8	-4,1	-7,8	-11,0	-5,2	-9,4	-13,3	-6,1

Tabelle 3.2: Abweichungen der relativen Feuchte der einzelnen Fühler bezüglich Tauspiegel/Pt100

• Hy-Cal IH 3602 C

Den geringsten Unterschied zur Referenzfeuchtemessung liefern die Hy-Cal-Fühler IH 3602 C mit 0,8 % r.F. bzw. -1,3 % r.F. mittlerer Abweichung. Die Temperaturmessung liegt bei beiden ungefähr 0,5 K unterhalb der Referenztemperatur.

• Hy-Cal IH 3605

Am weitesten von der Referenzfeuchte entfernt liegen die Meßergebnisse der unkalibrierten Hy-Cal IH 3605. Da die Sensoren keinen Temperaturfühler besitzen, wurde die in Tabelle 3.3 angegebene absolute Feuchte unter Verwendung der Referenztemperatur des Electrotherm Pt 100 ermittelt. Während sich mit einer angepaßten Kennlinie das Verhalten des IH 3605 (2) sehr gut an die Referenzfeuchte angleichen läßt, ist der IH 3605 (1) aufgrund der großen zeitlichen Drift nicht für Präzisionsmessungen einsetzbar.

• Sensirion SHT 11

Die beiden Sensirion-Fühler haben eine mittlere Abweichung von circa -8 % r.F. von der Referenzfeuchte. Hierbei fällt ihr nahezu identisches Verhalten positiv auf. Die Temperaturmessung liegt im Mittel 0,8 K höher als die Referenztemperatur. Wahrscheinlich sind die Temperatur- und die Feuchtemeßabweichung das Resultat einer zu großen Eigenerwärmung der Sensoren.

3.2.2 Einordnung der Ergebnisse

Zusammenfassend ist festzuhalten, daß auch in der heutigen Feuchtesensorik erhebliche Unterschiede zwischen den Produkten verschiedener Hersteller bestehen. Falls die absolute Genauigkeit der Feuchte von Interesse ist, müssen (unabhängig von der Herstellerspezifikation)

Sollfeuchte in g/m ³	11,5	6,9	10,4	13,8	12,1	18,2	24,3	11,5
Solltemperatur in °C	25,0	20,0	20,0	20,0	30,0	30,0	30,0	25,0
$\Delta^c_{SA\ 200\ C-110}$ in g/m ³	-0,7	-0,4	-0,3	-0,3	-1,3	-1,3	-1,6	-0,7
$\Delta^c_{SA\ 100\ C-100}$ in g/m ³	-2,4	-1,7	-2,1	-2,6	-2,7	-3,5	-4,3	-2,3
$\Delta^c_{IH\ 3602\ C\ (1)}$ in g/m ³	-0,1	0,3	0,0	-0,2	0,0	-0,8	-1,5	0,0
$\Delta^c_{IH\ 3602\ C\ (2)}$ in g/m ³	-0,5	0,0	-0,3	-0,6	-0,6	-1,4	-2,2	-0,4
$\Delta^c_{IH\ 3605\ (1)}$ in g/m ³	3,3	2,7	2,5	7,7	9,4	13,2	13,8	10,7
$\Delta^c_{IH\ 3605\ (2)}$ in g/m ³	3,2	2,7	2,4	2,2	4,5	3,8	3,3	3,6
$\Delta^c_{SHT\ 11\ (1)}$ in g/m ³	-1,2	-0,5	-1,0	-1,4	-1,2	-2,2	-3,1	-1,0
$\Delta^c_{SHT\ 11\ (2)}$ in g/m ³	-1,1	-0,4	-0,9	-1,2	-1,2	-2,3	-3,2	-1,0

Tabelle 3.3: Abweichungen der absoluten Feuchte der einzelnen Fühler bezüglich Tauspiegel/Pt100

Solltemperatur in °C	25,0	20,0	30,0	25,0
$\Delta^{\vartheta}_{SA\ 200\ C-110}$ in K	-0,2	0,1	-0,5	-0,5
$\Delta^{\vartheta}_{SA\ 100\ C-100}$ in K	-2,4	-2,4	-2,4	-2,4
$\Delta^{\vartheta}_{IH\ 3602\ C\ (1)}$ in K	-0,5	-0,4	-0,7	-0,7
$\Delta^{\vartheta}_{IH\ 3602\ C\ (2)}$ in K	-0,5	-0,3	-0,6	-0,6
$\Delta^{\vartheta}_{SHT\ 11\ (1)}$ in K	0,8	0,8	0,8	0,9
$\Delta^{\vartheta}_{SHT\ 11\ (2)}$ in K	0,8	0,9	0,7	0,7

Tabelle 3.4: Abweichungen der Temperatur der einzelnen Fühler bezüglich Pt100

die Feuchtesensoren regelmäßig kalibriert werden. Der Einsatz eines Tauspiegelhygrometers ist hierbei empfehlenswert.

Um die aus der Verlustleistung resultierenden Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Sensoren und der relativen Luftfeuchte abzuschätzen, wurde die Messung mit umsortierter Anordnung der Feuchtesensoren wiederholt. Hierbei ergaben sich vergleichbare Unterschiede bei der Feuchte- und Temperaturmessung der einzelnen Sensoren bezüglich der Referenz.

3.3 Methoden zur Erzeugung definierter Luftfeuchten

Im folgenden werden verschiedene Varianten zur Erzeugung definierter Luftfeuchten vorgestellt. Je nach Anwendungsfall muß eine geeignete Methode ausgewählt werden. Bezüglich der Untersuchung des Feuchteverhaltens von Präzisionsmeßgeräten müssen Kriterien wie:

- Feuchtebereich, der durch das verwendete Verfahren abgedeckt werden kann,

3 Grundlagen experimenteller Untersuchungen

- Dynamik der Feuchteconditionierung,
- Regelschwankungen,
- kritische Zustände bei Klimawechseln und
- Verunreinigung der Luft durch die Feuchteconditionierung

Beachtung finden.

3.3.1 Salzhygrostat

Über Salzlösungen stellt sich im Gegensatz zu reinem Wasser eine Dampfdruckerniedrigung ein. Bei gesättigten Salzlösungen hängt der Dampfdruck im wesentlichen von der Art (Löslichkeit) des Salzes ab. Eine Temperaturabhängigkeit des Dampfdrucks ist vorhanden, jedoch ist diese relativ gering. Somit hält sich der Aufwand zur Erzeugung einer korrekt feuchteconditionierten Luft mittels Salzhygrostaten in Grenzen.

Der Einsatz von Salzhygrostaten zur Feuchteconditionierung ist aber umstritten, da die Frage nach der Schädigung des Prüflings (des zu untersuchenden Präzisionsmeßgerätes) durch Ausdampfungen aus der Salzlösung in der Literatur kontrovers beantwortet wird.

In Tabelle 3.5 sind auszugsweise Angaben von D. Sonntag [27, S. 107] zur relativen Feuchte über verschiedenen Salzlösungen zusammengefaßt.

ϑ in °C	$\varphi(\text{LiCl})$ in % r.F.	$\varphi(\text{MgCl}_2)$ in % r.F.	$\varphi(\text{NaCl})$ in % r.F.
0	14,7	35,0	74,9
5	14,0	34,6	75,1
10	13,3	34,2	75,2
15	12,8	33,9	75,3
20	12,4	33,6	75,5
25	12,0	33,2	75,8
30	11,8	32,8	75,6
35	11,7	32,5	75,5
40	11,6	32,1	75,4
45	11,5	31,8	75,1
50	11,4	31,4	74,7

Tabelle 3.5: Temperaturabhängigkeit der relativen Feuchte über gesättigten Salzlösungen

3.3.2 Separater Befeuchter und Trockner

In Abbildung 3.2 ist das Funktionsschema einer Feuchteconditionierung mit separatem Befeuchtungs- und Trocknungsaggregat dargestellt.

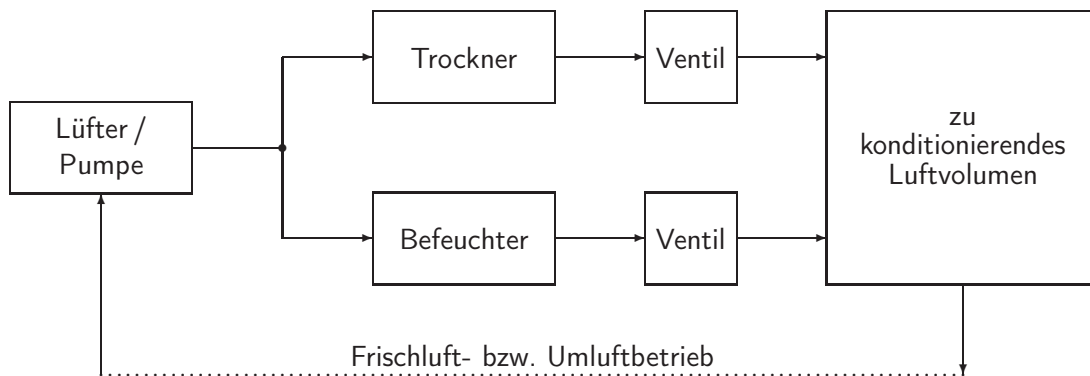


Abbildung 3.2: Feuchteconditionierung mit separatem Befeuchter und Trockner

Die Befeuchtung wird in der Regel durch einen Verdunstungsbefeuchter realisiert. Gelegentlich werden auch Dampfbefeuchter oder Ultraschallbefeuchter verwendet.

Bei einem Verdunstungsbefeuchter überströmt die zu befeuchtende Luft ein temperaturgeregeltes Wasserbad. Um eine relative Luftfeuchte von 100 % r.F. zu erreichen, muß die Temperatur des Befeuchterwassers mindestens ebenso groß wie die Temperatur der zu befeuchtenden Luft sein. In Abbildung 3.3 ist der Zusammenhang zwischen der Befeuchtertemperatur und der maximal erreichbaren Luftfeuchte dargestellt. Die Befeuchtertemperatur kann hierbei auch als maximal erreichbare Taupunkttemperatur interpretiert werden.

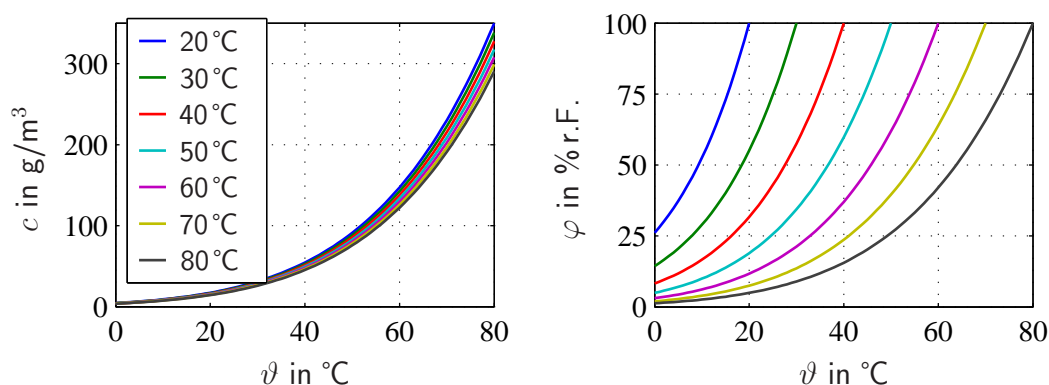


Abbildung 3.3: Zusammenhang zwischen der eingestellten Befeuchtertemperatur und der maximal erzielbaren absoluten Feuchte (links) und relativen Feuchte (rechts) mit der Lufttemperatur als Parameter

In der Praxis wird das Befeuchterwasser auf eine Übertemperatur von circa 20 K bezüglich der Solltaupunkttemperatur geregelt. Dadurch wird eine ausreichende Regeldynamik gewährleistet, und mögliche Feuchtesenken können kompensiert werden. Unter Berücksichtigung einer maximalen Befeuchtertemperatur von 100 °C (durch den Siedepunkt von Wasser unter Normaldruck bedingt) ist somit eine Sättigung der zu befeuchtenden Luft bis zu Temperaturen von 80 °C problemlos möglich.

Die Trocknung erfolgt durch Auskondensieren der Feuchte. Hierbei wird der Effekt ausgenutzt, daß das Wasserspeichervermögen von Luft mit abnehmender Temperatur sinkt. Kühlt

3 Grundlagen experimenteller Untersuchungen

man Luft unter die vorhandene Taupunkttemperatur ab, so kondensiert Wasser aus der Luft. Eine technische Grenze ist hierbei durch Probleme bei der Kühlung von Luft unterhalb 0°C durch Gefrieren des kondensierenden Wassers gegeben. Dadurch sind insbesondere bei niedrigen Temperaturen keine geringen relativen Luftfeuchten im zu konditionierenden Luftvolumen realisierbar. In Abbildung 3.4 ist die niedrigste mögliche relative Luftfeuchte im zu konditionierenden Volumen bei Kühlung bis 0°C in Abhängigkeit von der Lufttemperatur dargestellt. Diese entspricht einer minimal erreichbaren absoluten Feuchte von circa 4 g/m^3 . Im Gegensatz zur Befeuchtertemperatur wird die Trocknertemperatur in der Regel nicht an den aktuellen Feuchtesollwert angepaßt, sondern fest auf eine Temperatur leicht oberhalb von 0°C ($1^{\circ}\text{C} \dots 3^{\circ}\text{C}$) eingestellt. Durch eine adaptive Regelung der Trocknertemperatur können die Feuchteschwankungen im zu konditionierenden Luftvolumen verringert werden.

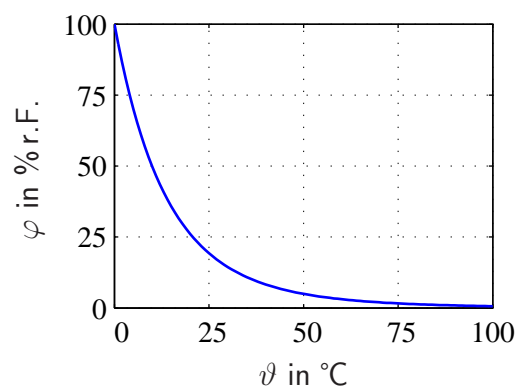


Abbildung 3.4: Niedrigste erreichbare relative Feuchte in Abhängigkeit von der Temperatur des zu konditionierenden Luftvolumens bei einer Trocknertemperatur (Taupunkttemperatur) von 0°C

Bei der Regelung der Luftfeuchte auf einen vorgegebenen Sollwert wird je nach Regelentscheidung getrocknet, befeuchtet oder gewartet, wobei der Luftstrom durch das entsprechende Aggregat mittels Ventil, wie in Abbildung 3.2 dargestellt, geschaltet wird. Durch dieses Prinzip wird die maximal erreichbare Regelgenauigkeit der Luftfeuchte je nach Befeuchtungs- bzw. Trocknungsleistung der Aggregate (auf das zu konditionierende Luftvolumen bezogen) in Abhängigkeit der Tastzeit der Regelung festgelegt. Die Tastzeit der Regelung kann aus praktischen Erwägungen wie Rechenzeit des regelnden Systems und Schalzhäufigkeit der Ventile nicht beliebig klein gewählt werden. Somit lassen sich die Regelschwankungen nur durch eine adaptive Einstellung der Leistung des Befeuchtungs- und des Trocknungsaggregates reduzieren.

Da unmittelbar nach dem Schalten der Ventile die maximale Befeuchtungs- bzw. Trocknungsleistung zur Verfügung steht, können durch dieses Verfahren große Änderungsgeschwindigkeiten der Luftfeuchtigkeit erreicht werden. Aus diesem Grund ist es sehr gut zur Untersuchung von dynamischen Feuchtwirkungen geeignet.

Durch einen Umluftbetrieb der Feuchteconditioniereinrichtung kann der Regelaufwand reduziert werden.

3.3.3 Kombinierte Befeuchter und Trockner

Ausgehend von dem in Abbildung 3.3 dargestellten Zusammenhang zwischen Befeuchtertemperatur und Luftfeuchte ist eine kombinierte Be- und Entfeuchtung durch ein thermostatisiertes Wasserbad möglich. Ist die Temperatur des überströmten (bzw. durchströmten) Wasserbades kleiner als die Solltaupunkttemperatur der feuchtezuregelnden Luft wird diese getrocknet. Der umgekehrte Fall wurde bereits bei der Funktion des Befeuchters im Abschnitt 3.3.2 beschrieben. In Abbildung 3.5 ist der prinzipielle Aufbau eines solchen Feuchteaggregates dargestellt.

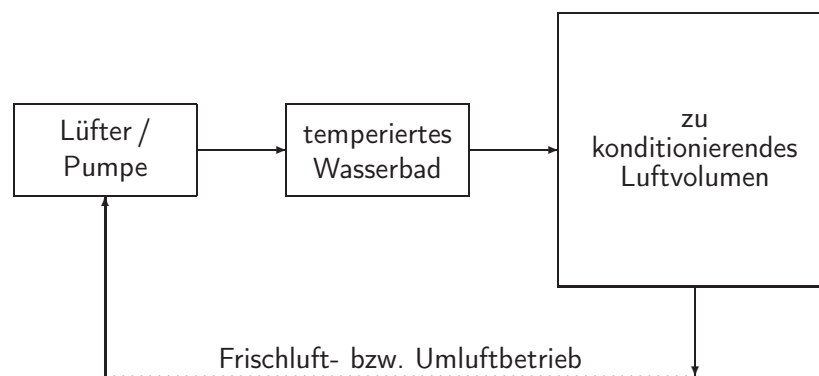


Abbildung 3.5: Feuchteconditionierung durch ein temperiertes Wasserbad

Um optimale dynamische und statische Eigenschaften einer solchen Feuchteconditioniereinrichtung zu erzielen, ist der Umluftbetrieb sinnvoll. Hierbei besteht jedoch die Gefahr einer Anreicherung der Luft mit Aerosolen. Der aus diesem Funktionsprinzip resultierende statische Arbeitsbereich des Feuchteaggregates ist analog zu dem in Abbildung 3.2 gezeigten Prinzip bei separater Verwendung von Befeuchter und Trockner. Die Regelgenauigkeit und die Regelschwankungen der Luftfeuchte hängen theoretisch nur noch von der Genauigkeit der Temperaturregelung des Wasserbades ab, da es sich um ein kontinuierliches Verfahren handelt. Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens resultiert aus dem direkten physikalischen Zusammenhang zwischen der Wassertemperatur und der Gleichgewichtsluftfeuchte. Ist das zu konditionierende Volumen ideal abgedichtet, so stellt sich automatisch die zur Wassertemperatur äquivalente Taupunkttemperatur ein. Somit ist in dem zu konditionierenden Luftvolumen eine Feuchtemeßstelle nicht zwingend notwendig, und das Verfahren eignet sich zur Kalibrierung von Feuchtemeßgeräten. Da die erzielbare Änderungsgeschwindigkeit der Luftfeuchte durch die Temperierung des Wasserbades begrenzt wird, sind keine schnellen Feuchtewechsel möglich. Das Verfahren ist somit für genaue Untersuchungen des statischen Verhaltens von Meßgeräten bzw. zur Konstanthaltung der Feuchte in abgeschlossenen Räumen geeignet.

3.3.4 Silikagelhygrostat

Im folgenden wird ein neues Prinzip zur Erzeugung definierter Luftfeuchten vorgestellt. Dieses patentierte Verfahren basiert auf der Temperierung von Silikagel [13]. Praktische Untersu-

3 Grundlagen experimenteller Untersuchungen

chungen bestätigten die hervorragende Eignung zur Feuchteconditionierung. Derzeit sind verschiedene Materialien mit einem hohen Wasserspeichervermögen bekannt. Diese nehmen in Abhängigkeit von Temperatur und Umgebungsfeuchte eine bestimmte Menge Wasser(-dampf) auf. Der statische Zusammenhang der Wasseraufnahme wird durch die Sorptionsisothermen des Materials beschrieben und ist für viele Stoffe aus der Literatur entnehmbar. Aufgrund der Verfügbarkeit und der günstigen Pufferungseigenschaften sind alle nachfolgend angegebenen Zusammenhänge mit den Stoffdaten von Silikagel ermittelt. Prinzipiell sind aber auch andere Stoffe für dieses Verfahren einsetzbar. In Abbildung 3.6 sind die Sorptionsisothermen von Silikagel bei verschiedenen relativen Feuchten über der Temperatur dargestellt. Zur Berechnung der Kurven fand die BDDT-Sorptionsisothermengleichung mit den von Busweiler [5] ermittelten Silikagelparametern Verwendung.

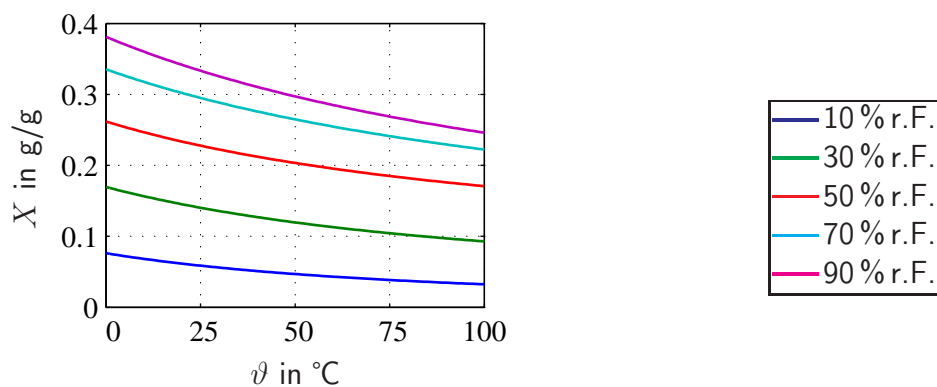


Abbildung 3.6: Temperaturabhängige statische Beladung von Silikagel

Es ist zu erkennen, daß die im Silikagel gespeicherte Wassermenge (Beladung) mit steigender Temperatur abnimmt. Somit ist es durch Variation der Silikageltemperatur möglich, Wasser reversibel an die umgebende Luft abzugeben, bzw. welches aus dieser zu absorbieren.

Unter Ausnutzung dieses Effektes kann die Luftfeuchte in weitgehend abgeschlossenen Räumen in einem großen Bereich sehr genau und mit geringem Aufwand kontinuierlich eingestellt werden, indem die Temperatur, einer hinreichend großen Menge Silikagel, entsprechend verändert wird. Im Unterschied zu der im Abschnitt 3.3.3 beschriebenen Feuchteconditionierung mittels eines temperierten Wasserbades ist die Temperatur des Silikagels nicht mit dem sich einstellenden Taupunkt der Luft identisch. Das hat den Nachteil, daß in dem feuchtezuregelnden Luftvolumen eine Feuchtemeßstelle zwingend notwendig ist. Auf der anderen Seite bietet es den Vorteil, daß der Bereich der Temperierung des Silikagels an den geforderten Luftfeuchtebereich optimal angepaßt werden kann.

Der Einstellbereich der Luftfeuchte im zu konditionierenden Volumen hängt bei einem vorgegebenen Bereich der Temperierung des Silikagels von der Masse des Silikagels im Verhältnis zum Luftvolumen und von der gewählten Anfangsbeladung des Silikagels ab. Es ist also möglich, die Temperierung des Silikagels ohne Kühlaggregat zu realisieren, indem die mittlere Silikageltemperatur auf einen Wert deutlich oberhalb der Temperatur der Umgebungsluft eingestellt wird. Die Kühlung kann in diesem Fall mittels konvektiver Wärmeabgabe an die Umgebung erfolgen.

In Abbildung 3.7 ist der prinzipielle Aufbau einer silikagelbasierenden Feuchteconditionierung dargestellt.

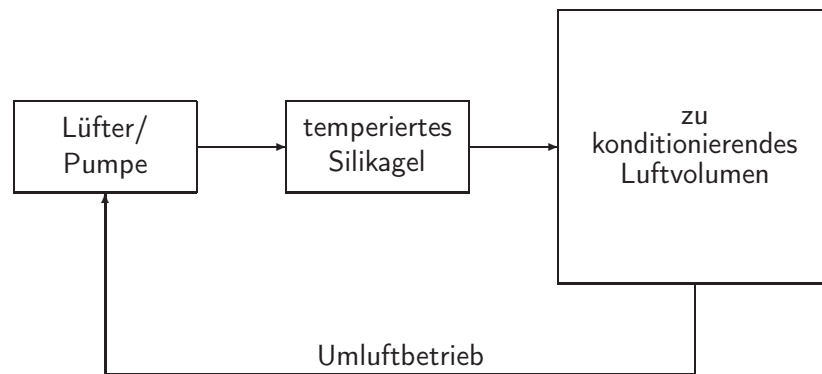


Abbildung 3.7: Feuchteconditionierung durch temperiertes Silikagel

Abbildung 3.8 zeigt eine mögliche technische Umsetzung dieses Prinzips. Durch die beiden Ventile (5,6) läßt sich eine Verbindung zur Umgebungsluft herstellen. In Abhängigkeit von der Luftfeuchte der Umgebungsluft kann durch gezielte Temperierung des Silikagels die gewünschte Anfangsbeladung realisiert werden. Dieser Vorgang wird auch als Vorkonditionierung des Silikagels bezeichnet. In Abbildung 3.9 ist der Zusammenhang zwischen Silikageltemperatur, Umgebungsluftfeuchte und Anfangsbeladung dargestellt.

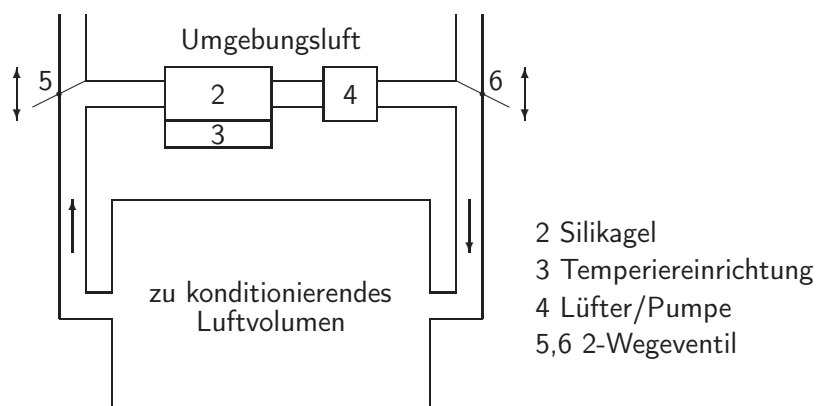


Abbildung 3.8: Realisierung eines Silikagelhygrostaten mit einstellbarer Anfangsbeladung

3 Grundlagen experimenteller Untersuchungen

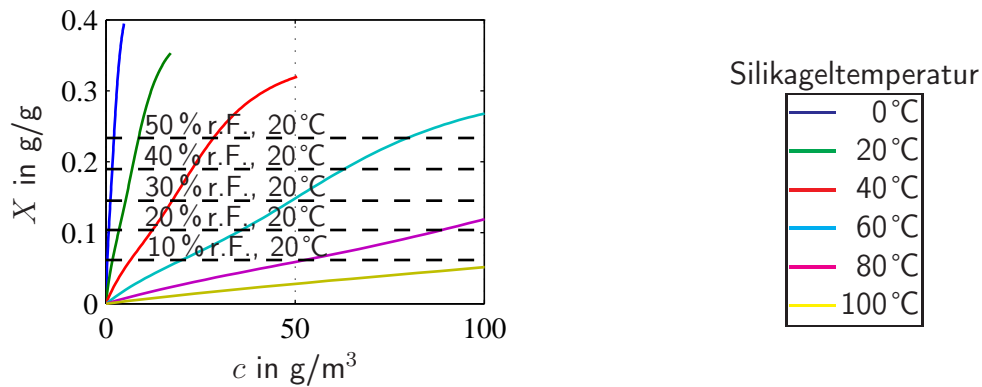


Abbildung 3.9: Anfangsbeladung des Silikagels in Abhängigkeit von der absoluten Feuchte der Umgebungsluft mit der Temperatur des Silikagels als Parameter

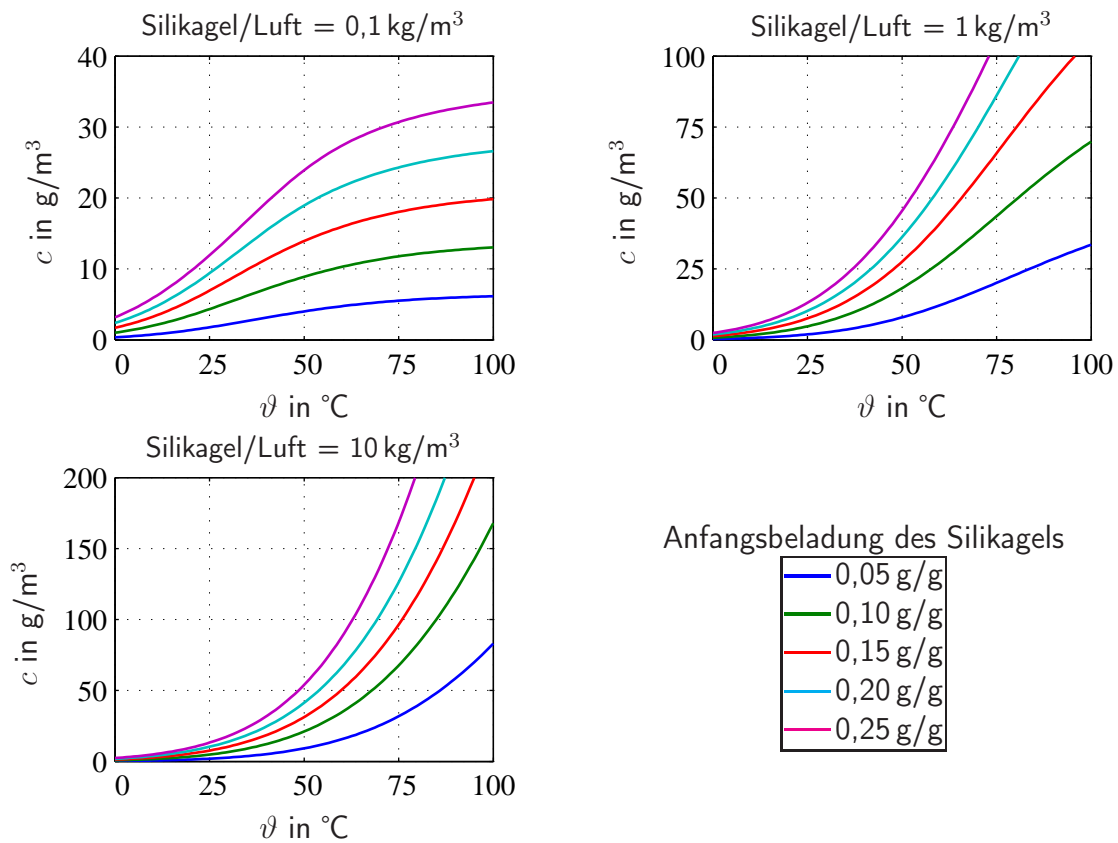


Abbildung 3.10: Absolute Feuchte im zu konditionierenden Luftvolumen in Abhängigkeit von der Silikageltemperatur für drei verschiedene Verhältnisse der Masse des Silikagels zum Luftvolumen mit der Anfangsbeladung des Silikagels als Parameter

Abbildung 3.10 zeigt die im zu konditionierenden Luftvolumen rechnerisch erreichbare absolute Feuchte für verschiedene Verhältnisse zwischen der Masse des Silikagels und dem

Luftvolumen. Als Parameter wird die Anfangsbeladung des Silikagels berücksichtigt. Hierbei ist zu erkennen, daß bei einem ausreichend großen Verhältnis von Silikagel zum zu regelnden Luftvolumen und einer günstigen Anfangsbeladung des Silikagels ein weiter Feuchtebereich abgedeckt werden kann.

In Folge der großen aktiven Silikageloberfläche sind höhere Feuchteänderungsgeschwindigkeiten als bei Verwendung eines temperierten Wasserbades zur Feuchteconditionierung (siehe Abschnitt 3.3.3) erreichbar. Eine Anreicherung der Luft mit Aerosolen ist nicht zu befürchten, da diese ebenfalls vom Silikagel absorbiert werden.

Aufgrund des geringen Masse- und Platzbedarfes können transportable Feuchteaggregate realisiert werden. Dadurch werden Feuchteuntersuchungen an ortsgebundenen oder transportempfindlichen Meßgeräten möglich.

3.4 Optimale Regelung der Luftfeuchte

Nachdem verschiedene Methoden zur Erzeugung definierter Luftfeuchten erläutert wurden, wird in diesem Abschnitt ein Algorithmus zur Regelung der Luftfeuchte vorgestellt. Als Optimalitätskriterien finden hierbei folgende Punkte Beachtung:

- Die Feuchtesollwerte sollten nach kurzer Zeit erreicht werden.
- Es dürfen keine das Prüfgut gefährdenden Zustände, wie beispielsweise das Überschreiten der Sättigungsluftfeuchte, auftreten.
- Die Regelung sollte, vor allem bei dem im Abschnitt 3.3.2 beschriebenen Konditionierungsverfahren, energetisch optimal sein, um die Schalzhäufigkeit der Ventile und Aggregate zu minimieren.

Um diese Kriterien einzuhalten, spielt neben dem eigentlichen Regelalgorithmus die Frage nach der Darstellungsvariante der Feuchte im Regelprozeß eine zentrale Rolle.

Üblicherweise werden die gewünschten Sollwerte einer Feuchteconditionierung als relative Feuchte vorgegeben. Die Regelung führt einen Vergleich zwischen den Feuchteistwerten und den Feuchtesollwerten durch und trifft daraus eine Regelentscheidung. Falls Luftfeuchte und Lufttemperatur gemeinsam geregelt werden sollen, ist die relative Feuchte keine optimale Regelgröße. Die relative Feuchte ist temperaturabhängig, und somit wird die Feuchterege- lung durch die Temperaturregelung beeinflusst. Das folgende Beispiel soll diese Wechselwirkung und die daraus resultierenden Probleme verdeutlichen.

Beispiel:

Im Nutzraum einer Klimaprüfkammer soll das Klima von $\vartheta = 30^\circ\text{C}$, $\varphi = 40\% \text{ r. F.}$ auf $\vartheta = 20^\circ\text{C}$, $\varphi = 70\% \text{ r. F.}$ geändert werden. Bei beiden Klimazuständen liegt in etwa die gleiche absolute Feuchte von $c = 12,1 \text{ g/m}^3$ vor. Demnach würde es genügen, die Temperatur um 10 K abzusenken, um das neue Klima korrekt einzustellen. Weder Befeuchten noch Trocknen der Luft sind hierbei notwendig, da die Wasserdampfmenge im Nutzraum konstant bleibt.

3 Grundlagen experimenteller Untersuchungen

Eine direkte Regelung der relativen Feuchte würde in diesem Fall keine optimalen Ergebnisse liefern. Aufgrund der Sollwerte von Temperatur und relativer Feuchte würde diese zu Beginn des Klimawechsels zugleich kühlen und befeuchten und später wieder trocknen, um das neue Klima korrekt einzustellen.

Aus diesem Fehlverhalten resultieren folgende Probleme:

- Bis die Klimaprüfkammer das überflüssige Befeuchten durch Trocknen korrigiert, kann der Taupunkt im Nutzraum durchaus überschritten werden. Beschädigungen am Prüfgut bzw. unbrauchbare Messungen wären die Folge.
- Die Zeit zur korrekten Einstellung des neuen Klimas ist unnötig lang.

Auch im eingeschwungenen Zustand, d. h. wenn die Sollwerte von Lufttemperatur und Luftfeuchte korrekt eingestellt sind, ist die direkte Regelung der relativen Feuchte nicht energieoptimal. Jede reale Temperaturregelung weist Regelschwankungen auf. Diese beeinflussen wiederum den Verlauf der relativen Feuchte. Somit kann je nach Regelalgorithmus ein unsinniges Hin- und Herschalten zwischen Trocknen und Befeuchten, zur Stabilisierung der relativen Feuchte, resultieren.

Eine Lösung für diese Probleme bietet ein Regelalgorithmus, welcher die temperaturunabhängigen Darstellungsvarianten absolute Feuchte (bei isochorer Betrachtung) oder Dampfdruck (bei isobarer Betrachtung) als Regelgröße berücksichtigt.

Die Vorgabe der Feuchtesollwerte erfolgt sinnvollerweise weiterhin als relative Feuchte. In einem Zwischenschritt wird die absolute Sollfeuchte aus Solltemperatur und relativer Sollfeuchte errechnet. Diese absolute Sollfeuchte bildet nunmehr die Führungsgröße für die Feuchtereuerung. Falls der Feuchtefühler der Klimaprüfkammer die relative Feuchte mißt, was z. B. bei kapazitiven Meßverfahren der Fall ist, so muß die absolute Istfeuchte aus relativer Istfeuchte und Isttemperatur errechnet werden.

Im Ergebnis erhält man eine feuchteoptimale Regelung, wobei die praxistaugliche Eingabe der Sollwerte als relative Feuchte beibehalten werden kann.

3.5 Versuchsplanung

Um anhand experimenteller Untersuchungen gesicherte Aussagen über das Feuchte- bzw. Temperaturverhalten eines Präzisionsmeßgerätes treffen zu können, müssen die zeitlichen Verläufe von Feuchte und Temperatur beim Experiment richtig gewählt werden. Günstig ist hierbei die gemeinsame Aussteuerung von Feuchte und Temperatur nach einem sogenannten optimalen Versuchsplan [32, S. 232 ff]. Hierdurch ist ein maximaler Informationsgewinn bei geringem rechnerischen Auswerteaufwand und einer minimalen Versuchsanzahl erzielbar.

Feuchteversuche bei konstanter Temperatur bieten den Vorteil geringerer Versuchszeiten, jedoch können die Wechselwirkungen zwischen Temperatur und Feuchte nicht erkannt werden. Viele Präzisionsmeßgeräte weisen jedoch ein temperaturabhängiges Feuchteverhalten auf.

Ein weiteres praktisches Problem ist, daß die Feuchtereuerung als Störgröße auf die Temperaturregelung von Klimaprüfkammern wirkt. Durch Befeuchten bzw. Trocknen wird warme

feuchte Luft bzw. kalte trockene Luft in den Nutzraum der Klimaprüfkammer eingebracht. Dadurch können durchaus feuchteabhängige Fehler im statischen Temperaturverlauf im Bereich von mehreren zehntel Kelvin resultieren.

Das scheint auf den ersten Blick nicht besonders kritisch. Häufig haben Präzisionsmeßgeräte eine größere Temperatur- als Feuchteabhängigkeit. Dadurch können auch diese kleinen Temperaturfehler, die stark mit der Luftfeuchte korrelieren, das Verhalten des untersuchten Präzisionsmeßgerätes beeinflussen. Folglich können Temperatur- und Feuchteeinfluß nicht mehr korrekt voneinander getrennt werden.

Bei orthogonalen Versuchsplänen werden die verschiedenen Eingangsgrößen (Feuchte und Temperatur) so angesteuert, daß sie unkorreliert sind und sich somit ihre Auswirkungen auf das zu untersuchende Präzisionsmeßgerät eindeutig separieren lassen. Die Zeit je Klimazyklus sollte dabei so groß gewählt werden, daß die statischen Endzustände der Reaktion des Prüfgutes auf die Klimawechsel erreicht werden. Diese Zeitdauer hängt stark vom untersuchten Präzisionsmeßgerät (Gehäusevolumen und -öffnungen, Materialien im Meßgerät) ab und kann im Bereich von wenigen Stunden bis zu mehreren Tagen differieren.

Die Amplituden von Feuchte und Temperatur sollten maximal bezüglich des interessierenden Klimabereiches des Präzisionsmeßgerätes angesteuert werden.

In Abbildung 3.11 ist ein Beispiel für die Realisierung eines orthogonalen Versuchsplanes zur Ermittlung des statischen Verhaltens eines linearen Systems mit einer Zykluszeit von einem Tag dargestellt. Hierbei wird der Arbeitspunkt ($\vartheta = 25^\circ\text{C}$, $\varphi = 50\% \text{ r.F.}$) am Anfang und am Ende des Versuches angefahren, um eine eventuelle Drift des Gerätes während des Untersuchungszeitraumes feststellen zu können. Prinzipiell kann man den Verlauf der Feuchte mit dem der Temperatur vertauschen, ohne die Orthogonalität des Versuchsplanes zu verletzen. Der hier vorgestellte Klimaverlauf ist jedoch auf Feuchteuntersuchungen optimiert. Ob man die relative oder die absolute Feuchte als Eingangsgröße wählt, hängt vom jeweiligen zu untersuchenden Zusammenhang ab.

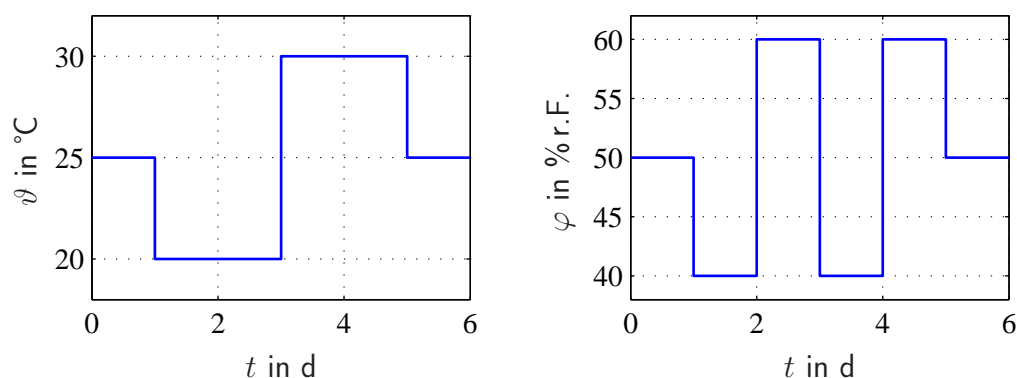


Abbildung 3.11: Möglicher zeitlicher Verlauf von Temperatur und relativer Feuchte bei einem orthogonalen Versuchsplan

Bei allen untersuchten Präzisionsmeßgeräten wurde ein nichtlineares Feuchteverhalten festgestellt. Das heißt, daß ein Gerät auf die gleichen Feuchteänderungen in verschiedenen Feuchte- und Temperaturarbeitspunkten unterschiedlich reagiert. Deshalb ist vor der Ver-

3 Grundlagen experimenteller Untersuchungen

suchsdurchführung unbedingt der Einsatzklimabereich des zu untersuchenden Präzisionsmeßgerätes zu prüfen, um die Eingangsgrößen Feuchte und Temperatur optimal auszusteuern. Im Abschnitt 5.3.4.1 wird das Thema Versuchsplanung im Hinblick auf die Ermittlung statischer Kompensationsmodelle erneut aufgegriffen. Auf Seite 78 wird ein Versuchsplan zur Ermittlung des statischen Verhaltens eines nichtlinearen Systems vorgestellt.

Feuchteversuche sind so zu entwerfen, daß keine Betauung im Gerät einsetzt, da durch Betauung starke Hystereseerscheinungen und irreversible Prozesse auftreten können. Besondere Aufmerksamkeit unter diesem Gesichtspunkt ist den Temperatur- und Feuchtwechseln zu widmen. Durch ein unterschiedliches dynamisches Verhalten der Temperatur- und Feuchteregelung von Klimaprüfkammern und die thermische Trägheit des untersuchten Präzisionsmeßgerätes kann es relativ schnell zur Betauung im untersuchten Präzisionsmeßgerät kommen. Abhilfe kann durch geringe Änderungsgeschwindigkeiten von Temperatur und Feuchte oder durch einen zeitlichen Versatz zwischen den Temperatur- und Feuchtwechseln geschaffen werden. Dieser zeitliche Versatz wirkt sich ebenfalls positiv aus, wenn Aussagen über das dynamische Temperatur- und Feuchteverhalten getroffen werden sollen. Dadurch wird eine bessere Trennung zwischen Temperatur- und Feuchtedynamik möglich.

4 Einfluß der Luftfeuchte auf Präzisionsmeßgeräte

4.1 Ursachen der Feuchteabhängigkeit

Alle derzeit bekannten Werkstoffe binden je nach Umgebungsluftfeuchte eine gewisse Anzahl Wassermoleküle an sich. Der materialspezifische Gleichgewichtszustand der Wasserbeladung in Abhängigkeit von der Luftfeuchte und der Temperatur wird durch die Sorptionsisothermen (siehe Abschnitt 2.4, Seite 17 ff) beschrieben. Bei Feststoffen sinkt das Wasserspeichervermögen (Wasseranlagerungsvermögen) mit steigender Temperatur. Dagegen weist Luft ein umgekehrtes Verhalten auf.

Die „Wasseraufnahme“ von Metallen beschränkt sich in der Regel auf Oberflächeneffekte (Adsorption). Je nach Klima und Oberflächenbeschaffenheit lagert sich eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Wasserschicht an der Metalloberfläche an. Aus diesem Grund wird die Beladung von Metallen, im Gegensatz zu der von porösen Stoffen, nicht massenbezogen, sondern flächenbezogen angegeben. Die adsorbierte Wasserschicht besteht im wesentlichen aus chemisch und aus physikalisch gebundenem Wasser. Aufgrund der großen Bindungsenergie hängt die Menge des chemisch gebundenen Wassers, im Unterschied zum physikalisch gebundenen Wasser, kaum von der Umgebungsfeuchte ab. Beeinflußbar ist sie vor allem durch die Rauheit und den Reinigungszustand der Oberfläche. In den Abbildungen 4.1 und 4.2 sind die feuchteabhängigen Beladungen material- und oberflächenabhängig für ausgewählte Metalle dargestellt. Die Beladungskurven in Abbildung 4.2 wurden nach der BET-Sorptionsisothermengleichung (Gleichung (2.26), Seite 18) mit den von Kochsiek [30, S. 262] angegebenen Parametern errechnet. Das chemisch gebundene Wasser wurde hierbei durch die Offsetbeladung $X_{\varphi=0}$ berücksichtigt.

4 Einfluß der Luftfeuchte auf Präzisionsmeßgeräte

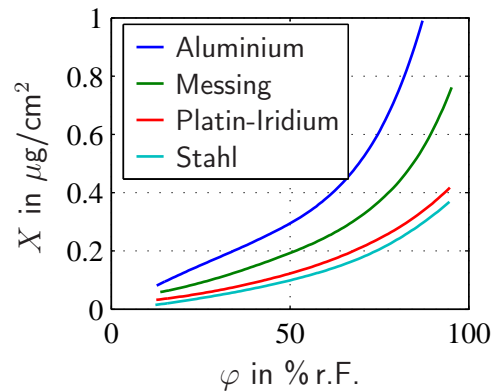


Abbildung 4.1: Flächenbezogene Beladung verschiedener polierter Metalloberflächen mit einer Rauheit $R_z \approx 0,2 \mu\text{m}$ [19, S. 30]

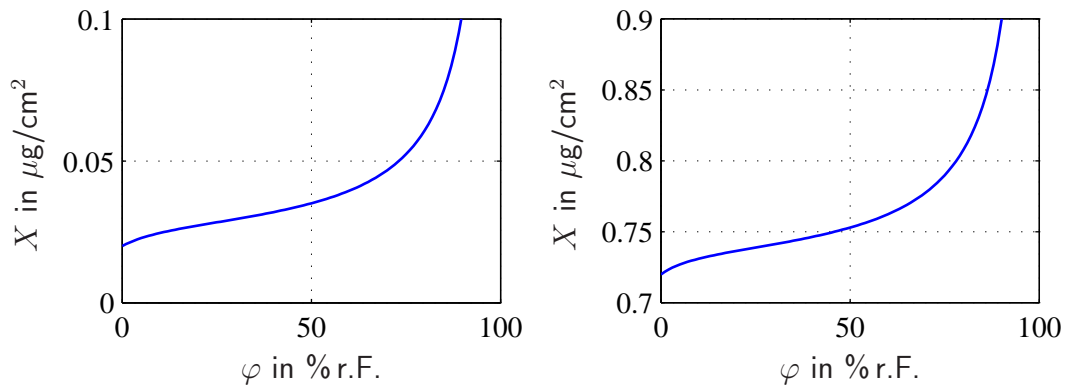


Abbildung 4.2: Flächenbezogene Beladung einer gereinigten (links, BET-Parameter: $a = 8,9$, $X_m = 0,0084 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, $X_{\varphi=0} = 0,02 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) und einer ungereinigten (rechts, BET-Parameter: $a = 11,2$, $X_m = 0,018 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, $X_{\varphi=0} = 0,72 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) Stahloberfläche mit einer Rauheit $R_z \leq 0,1 \mu\text{m}$

In poröse Materialien kann je nach Porengröße Wasserdampf eindringen und angelagert werden. Dazu zählen z. B. einige Kunststoffe, besonders Klebstoffe, Keramik, Holz, Gewebe und andere.

Das eingelagerte Wasser kann verschiedene Werkstoffeigenschaften zum Teil erheblich beeinflussen.

In Tabelle 4.1 sind die Auswirkungen der Wasseraufnahme auf Werkstoffeigenschaften zusammengestellt. Hierbei wird zwischen reversiblen und irreversiblen Auswirkungen unterschieden. Irreversible Feuchtwirkungen sind äußerst unangenehme Effekte, die zum Teil nur einmalig auftreten und zu dauerhaften Beschädigungen führen können. Diese Effekte vollziehen sich vor allem bei Luftfeuchten oberhalb 70 % r.F., wobei hohe Temperaturen verstärkend wirken.

reversibel	irreversibel
<ul style="list-style-type: none"> • elektrische Beeinflussungen, z. B. Widerstand, Kapazität, Induktivität • mechanische Beeinflussungen, z. B. Masse, Volumen, Federkonstante, Lageänderung von Bauteilen • Veränderung optischer Eigenschaften, z. B. Brechzahl, Transmissionsgrad • Einflüsse aus der Änderung der Luftdichte, z. B. Auftrieb • thermische Einflüsse durch Sorptionswärme 	<ul style="list-style-type: none"> • chemische Reaktionen, z. B. Korrosion • mechanische Veränderungen, z. B. Kleberablösung, Rißbildung durch unterschiedliches Quellverhalten in Verbundmaterialien • biologische Wirkungen, z. B. Schimmelbildung

Tabelle 4.1: Einfluß der Feuchtigkeit auf Werkstoffe und physikalische Eigenschaften

Eine nicht vernachlässigbare Wirkung der Luftfeuchtigkeit ist die Reduzierung elektrostatischer Aufladungen. Haben diese Einfluß auf ein Präzisionsmeßgerät, so sollte die Luftfeuchte nicht unter 30 % r.F. betragen. Elektrostatische Aufladungen lassen sich jedoch auch ohne das Vorhandensein von Luftfeuchtigkeit reduzieren. Sogenannte Ionisatoren reichern die Luft mit frei beweglichen Ladungsträgern an und minimieren dadurch elektrostatische Aufladungen.

Die bisherigen Betrachtungen beschränkten sich weitgehend auf die beladungsabhängigen Feuchtwirkungen von Materialien. Aber auch die feuchte Luft kann direkten Einfluß auf physikalische Effekte haben. Beispielhaft sei die Feuchteabhängigkeit von Luftdichte und Luftbrechzahl genannt.

Kochsiek gibt in [18, S. 31 f] folgende Größengleichung zur Berechnung der Luftdichte in Abhängigkeit von Druck, Temperatur und Feuchte an:

$$\rho_{Luft} = 0,3485 \frac{p}{T} - 0,132 \frac{p_D}{T} \quad (4.1)$$

mit: ρ_{Luft} in kg/m³, T in K, p in hPa und p_D in hPa.

Bedeutung erlangt dieser Zusammenhang z. B. in der Präzisionswägetechnik, da die Luftdichte den Auftrieb und somit das Wägeergebnis beeinflusst. In Abbildung 4.3 ist der nach Gleichung (4.1) ermittelte Zusammenhang zwischen der relativen Luftfeuchte (aus Dampfdruck und Temperatur errechnet) und der Luftdichte bei verschiedenen Temperaturen unter

4 Einfluß der Luftfeuchte auf Präzisionsmeßgeräte

Normaldruck dargestellt. Hierbei ist zu erkennen, daß die Empfindlichkeit der Luftdichteänderung bezüglich der relativen Feuchte temperaturabhängig ist.

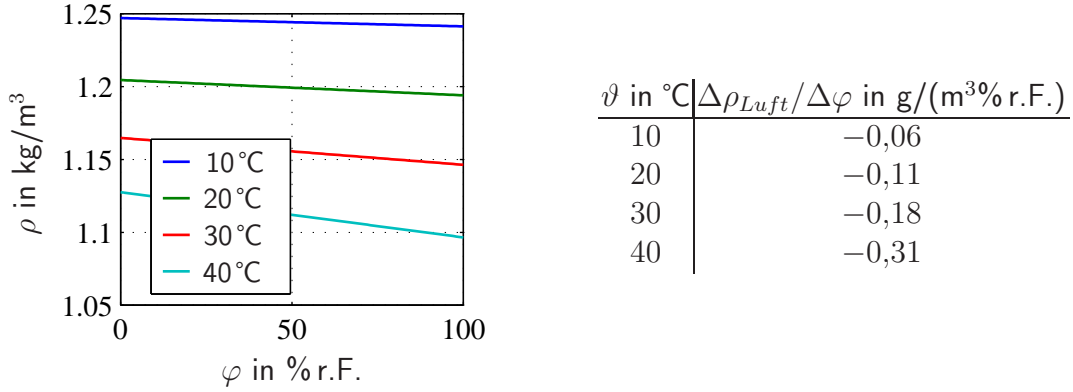


Abbildung 4.3: Abhängigkeit der Luftdichte von relativer Feuchte und Temperatur bei Normaldruck (links) und mittlere Empfindlichkeit der Feuchteabhängigkeit der Luftdichte (rechts)

Eine gebräuchliche Variante zur Beschreibung der temperatur-, druck- und feuchteabhängigen Änderung der Brechzahl der Luft ist die Edlén-Formel. Neuere Messungen zeigten, daß der Wasserdampfeinfluß durch die Edlén-Formel nicht korrekt beschrieben wird. Wilkening gibt in [34] folgende Abhängigkeit der Refraktivität vom Wasserdampfdruck an.

$$(n_{Luft} - 1)_{\vartheta,p,p_D} = (n_{Luft} - 1)_{\vartheta,p} - p_D \cdot (3,72 - 0,0343 \cdot \sigma^2) \cdot 10^{-8} \quad (4.2)$$

mit: σ (Wellenzahl) in $1/\mu\text{m}$ und p_D in hPa

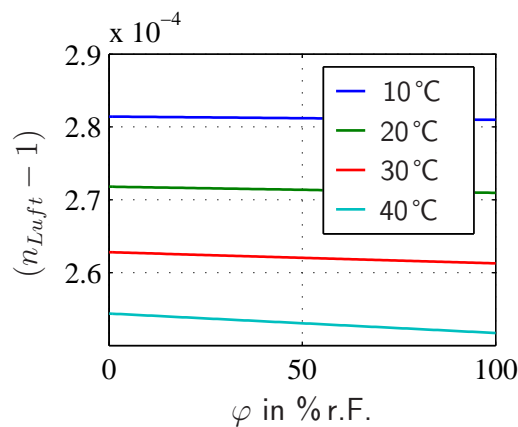
Da in der Laserinterferometrie häufig mit stabilisierten HeNe-Lasern gearbeitet wird, ist in Gleichung (4.3) die Edlén-Formel mit der Feuchteabhängigkeit nach Gleichung (4.2) für eine Lichtwellenlänge von 633 nm angegeben [34].

$$(n_{Luft} - 1) = 2,8776 \cdot 10^{-7} p \frac{1 + p(0,612 - 0,01\vartheta) \cdot 10^{-6}}{1 + 0,003661\vartheta} - 3,63 \cdot 10^{-8} p_D \quad (4.3)$$

mit: ϑ in °C, p in hPa und p_D in hPa

Abbildung 4.4 zeigt den Zusammenhang zwischen der Refraktivität und der relativen Luftfeuchte mit der Temperatur als Parameter.

Um in der Laserinterferometrie Genauigkeiten im (Sub-)Nanometerbereich zu erzielen, muß die Feuchteabhängigkeit der Brechzahl berücksichtigt werden. Ändert sich beispielsweise bei einer Temperatur von 20°C die relative Feuchte von 40 % r.F. auf 60 % r.F., was einer Dampfdruckerhöhung von $\approx 4,7$ hPa entspricht, so resultiert hieraus eine Brechzahländerung von circa $-1,7 \cdot 10^{-7}$. Der Meßweg ist proportional zu n_{Luft}^{-1} .



ϑ in °C	$\Delta n_{Luft} / \Delta \varphi$ in 1/% r.F.
10	$-0,45 \cdot 10^{-8}$
20	$-0,85 \cdot 10^{-8}$
30	$-1,54 \cdot 10^{-8}$
40	$-2,68 \cdot 10^{-8}$

Abbildung 4.4: Änderung der Brechzahl der Luft (bezüglich der Brechzahl im Vakuum) in Abhängigkeit von der Feuchte und der Temperatur unter Normaldruck (links) und mittlere Empfindlichkeit der Feuchteabhängigkeit der Brechzahl (rechts)

Durch die Änderung der Luftfeuchte sind über die in Tabelle 4.1 genannten Feuchtwirkungen Beeinflussungen des Meßwandlers und somit des Meßergebnisses möglich. Die Feuchteabhängigkeit von Meßgeräten resultiert aus der Tatsache, daß bestimmte Bauteile Wasser(-dampf) aufnehmen und dadurch für das Meßergebnis relevante Eigenschaften ändern. Wie schon gezeigt, kann zwischen der Luftfeuchte und dem Meßergebnis ebenfalls ein unmittelbarer Zusammenhang bestehen.

Die Feuchteabhängigkeit eines Präzisionsmeßgerätes ergibt sich demzufolge aus der Summe aller für das Meßergebnis relevanten Auswirkungen der Beladungsänderung von Bauteilen und der feuchten Luft.

Diese Beladungsänderungen müssen nicht zwangsläufig durch Schwankungen der Umgebungsfeuchte hervorgerufen werden. Temperaturabhängige Beladungsänderungen können ebenfalls der Feuchteabhängigkeit zugeordnet werden.

4.2 Feuchtetransport zwischen Meßgerät und Umgebung

Im vorigen Abschnitt wurde die Frage nach den Ursachen der Feuchteabhängigkeit von Meßgeräten geklärt. Dabei wurde davon ausgegangen, daß die feuchtesensiblen Bauteile auf Änderungen der Luftfeuchte reagieren. In diesem Abschnitt werden Varianten beschrieben, auf denen der Feuchtetransport zwischen dem Gehäuse eines Meßgerätes und der Umgebungsluft vonstatten gehen kann. In Abbildung 4.5 ist die Zusammensetzung des Gesamtfeuchtetransportes aus verschiedenen Transportanteilen dargestellt.

Im Unterschied zur Temperatur, bei der Gradienten durch Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Konvektion verändert werden können, sind Konzentrationsänderungen grundsätzlich an einen Stofftransport gekoppelt. Da ein Großteil der derzeit erhältlichen Meßgeräte ein relativ feuchteundurchlässiges Metall- bzw. Kunststoffgehäuse besitzt, vollzieht sich der Konzen-

trationsausgleich des Gehäuseinneren mit der Umgebung im wesentlichen durch die Gehäuseöffnungen.

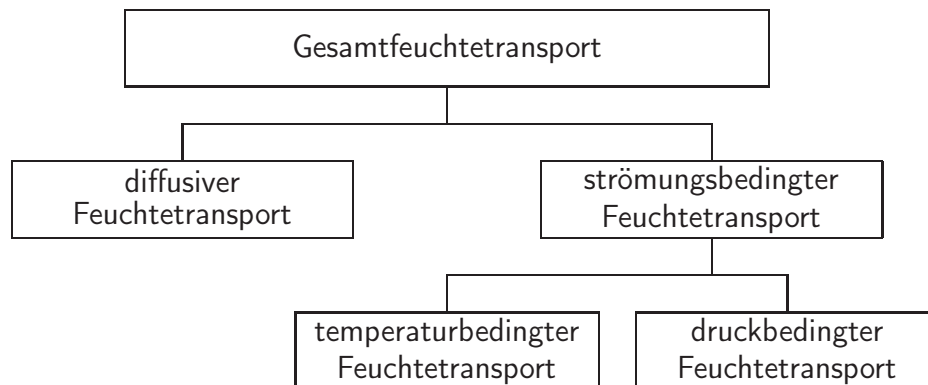


Abbildung 4.5: Zusammensetzung des Feuchtetransportes zwischen dem Gehäuse eines Meßgerätes und der Umgebungsluft

4.2.1 Diffusiver Feuchtetransport

Der diffusive Feuchtetransport zwischen dem Gehäuse eines Meßgerätes und der Umgebung wird im allgemeinen durch die im Kapitel 2 angegebenen Beziehungen beschrieben.

4.2.1.1 Modellierung des diffusiven Feuchtetransportes zwischen Meßgerät und Umgebung

Sind die geometrischen und stofflichen Daten eines Meßgerätes bekannt, so ist es möglich, das Verhalten der Wasserdampfkonzentration im Gehäuse in Abhängigkeit vom Umgebungsklima zu modellieren. Hierbei gehen das vom Gerät eingeschlossene Luftvolumen, die Öffnungsgeometrie (Fläche, Tiefe) des Gehäuses sowie die Sorptionseigenschaften der feuchteaufnehmenden Bauteile im Meßgerät als Eingangsgrößen in die Modellierung ein.

Zum besseren Verständnis der Problematik ist in Abbildung 4.6 das elektrische Ersatzschaltbild eines Gehäuses mit n feuchtesensiblen Bauteilen dargestellt. Dieses gilt nur unter der Voraussetzung, daß die Gehäuseluft keinen Konzentrationsgradienten aufweist. Da die Diffusionsvorgänge in Luft, im Vergleich zur Wasseraufnahme von Feststoffen, relativ schnell vonstatten gehen, ist der aus dieser Vereinfachung resultierende Fehler für die meisten praktischen Anwendungsfälle vernachlässigbar.

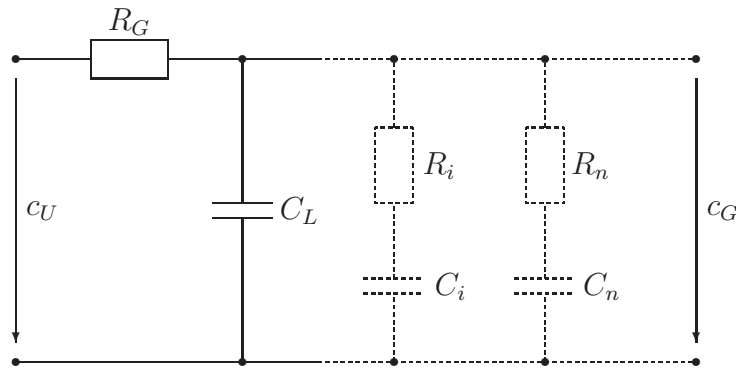


Abbildung 4.6: Elektrisches Ersatzschaltbild eines Gehäuses mit n feuchtesensiblen Bauteilen

- c_U, c_G : Feuchtekonzentration der Umgebungs- bzw. Gehäuseluft
 C_L : Feuchtekapazität (Volumen) der Luft im Gehäuse
 C_i, C_n : Feuchtekapazität des i -ten bzw. n -ten Bauteils (bezogen auf Luft)
 R_G : Widerstand des Gehäuses (der Gehäuseöffnungen) gegenüber der Wasserdampfdiffusion
 R_i, R_n : Diffusionswiderstand des i -ten bzw. n -ten Bauteils

Die Umgebungsluft und die Gehäuseluft stehen durch eine Anzahl von m Gehäuseöffnungen miteinander in Verbindung. Diese Öffnungen stellen dem Feuchtetransport einen gewissen Widerstand entgegen, der als Gehäusewiderstand R_G bezeichnet wird. Analog zum elektrischen Widerstand ergibt sich der Gehäusewiderstand aus

$$R_G = \left(\sum_{j=1}^m \frac{1}{R_j} \right)^{-1}. \quad (4.4)$$

Die Einzelwiderstände R_j ergeben sich aus der jeweiligen Öffnungsfläche A_j und der Länge (bzw. Tiefe) der Öffnung l_j wie in Gleichung (4.5) angegeben.

$$R_j = \frac{l_j}{D \cdot A_j} \quad (4.5)$$

Für genauere Betrachtungen muß der Diffusionswiderstand des Gehäusematerials berücksichtigt werden. Dieser ergibt sich ebenfalls nach dem in Gleichung (4.5) angegebenen Zusammenhang. Lediglich der Diffusionskoeffizient muß an das jeweilige Gehäusematerial angepaßt werden. In Tabelle 4.2 sind die Diffusionskoeffizienten von Wasserdampf für ausgewählte Kunststoffe zusammengestellt [21, S. 316]. Der Diffusionskoeffizient von Wasserdampf in Luft beträgt:

$D_{\text{Wasserdampf, Luft}}(20^\circ\text{C}, 1024 \text{ hPa}) = 0,0944 \text{ m}^2/\text{h}$ und ist im Vergleich zu den Diffusionskoeffizienten von Wasserdampf in Kunststoffen um den Faktor $10^3 \dots 10^8$ größer.

4 Einfluß der Luftfeuchte auf Präzisionsmeßgeräte

	D in m^2/h
Polyäthylen	$1,0 \cdot 10^{-9} \dots 6,8 \cdot 10^{-5}$
Polystyrol	$6,1 \cdot 10^{-8} \dots 1,5 \cdot 10^{-7}$
Polykarbonat	$4,3 \cdot 10^{-5}$
Polytetrafluoräthylen	$3,0 \cdot 10^{-9} \dots 1,0 \cdot 10^{-5}$
Polyamid	$3,0 \cdot 10^{-9}$

Tabelle 4.2: Diffusionskoeffizienten von Wasserdampf für ausgewählte Kunststoffe

Die Feuchtekapazität des Gehäuses C_L entspricht dem von der Gehäuseluft eingeschlossenen Volumen.

Zwischen der Gehäuseluft und den feuchtesensiblen Bauteilen im Gehäuse findet nun ein Konzentrationsausgleich statt. Die einzelnen Bauteile stellen dem Feuchtetransport wiederum einen Widerstand ($R_i \dots R_n$) entgegen. Bei Feststoffen wird das Wasseraufnahmevermögen massen- bzw. oberflächenbezogen angegeben. Zur korrekten Einarbeitung in das Ersatzschaltbild muß dieses Wasseraufnahmevermögen in ein Luftvolumen mit äquivalenter Speicherkapazität transformiert werden. Die Feuchtekapazität des i -ten Bauteils ergibt sich zu

$$C_i = \frac{m_i \cdot X_i}{c_L} \quad \text{für poröse Stoffe, d. h. } [X_i] = \text{g/g, bzw.}$$

$$C_i = \frac{A_i \cdot X_i}{c_L} \quad \text{bei Oberflächenbeladung (z. B. Metalle), d. h. } [X_i] = \text{g/m}^2. \quad (4.6)$$

Hierbei bedeuten m_i bzw. A_i die Masse bzw. die Oberfläche des feuchtespeichernden Stoffes. X_i ist die feuchteabhängige Beladungsfunktion, die durch die jeweilige Sorptionsisotherme beschrieben wird. Somit ist die Feuchtekapazität im allgemeinen eine Funktion von der Feuchte und der Temperatur.

Gleichung (2.19) zeigt, daß die zeitliche Beladung von Feststoffen nicht durch eine einfache Exponentialfunktion beschrieben wird. Ursache hierfür ist der Feuchtegradient im Feststoff während der Beladungsänderung. Durch diesen wird der Feuchtetransport zusätzlich verlangsamt. Für genaue Untersuchungen muß dieser Effekt berücksichtigt werden. In dem in Abbildung 4.6 angegebenen Ersatzschaltbild kann man ihn durch beladungsabhängige Diffusionswiderstände der feuchtesensiblen Bauteile nachbilden.

4.2.1.2 Berechnung der Diffusion von Wasserdampf in ein Gehäuse ohne feuchteaufnehmende Bauteile

In der Regel sind die Feuchtekapazitäten und -widerstände der feuchtesensiblen Bauteile eines Meßgerätes a priori nicht bekannt. Das vom Gehäuse eingeschlossene Luftvolumen und die Größe der Gehäuseöffnungen lassen sich jedoch relativ einfach abschätzen. Somit ist es sinnvoll, mit der Berechnung eines Gehäuses ohne feuchteaufnehmende Bauteile, wie in Abbildung 4.7 dargestellt, zu beginnen. Als Berechnungsgrundlage dient das in Abbildung 4.8

angegebene, reduzierte Ersatzschaltbild. Ziel der Berechnung ist eine Gleichung zur Beschreibung des (zeitlichen) Verlaufes der Wasserdampfkonzentration im Gehäuseinneren in Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchte.

Im Abschnitt 5.1.1 (Seite 55 ff) wird eine Berechnungsgleichung für ein Gehäuse mit einem feuchteaufnehmenden Bauteil (Feuchtepuffer) angegeben.

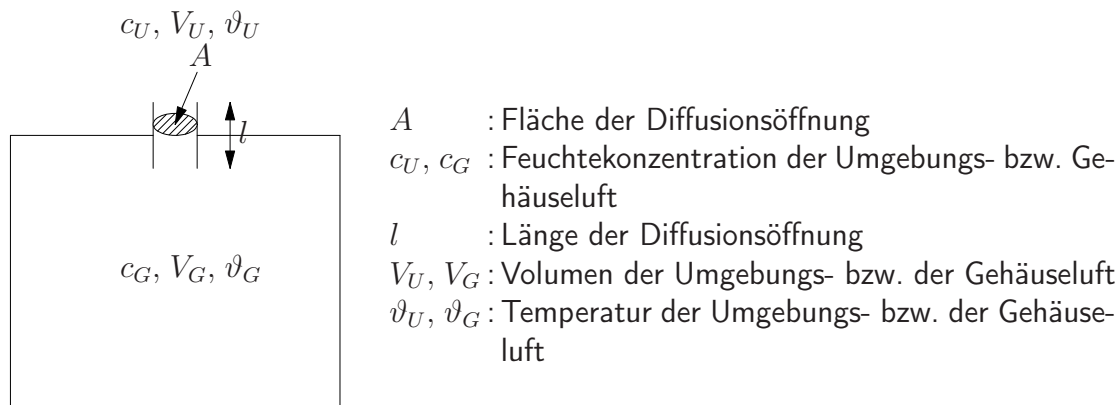


Abbildung 4.7: Prinzipskizze eines Gehäuses ohne feuchteaufnehmende Bauteile

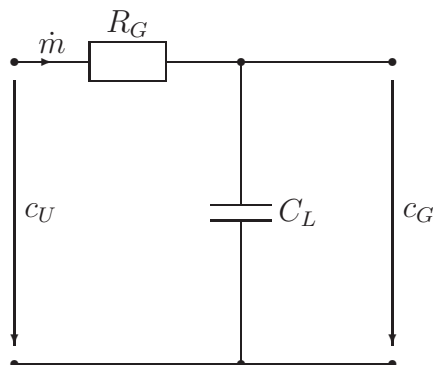


Abbildung 4.8: Ersatzschaltbild eines Gehäuses ohne feuchteaufnehmende Bauteile

Als Grundlage der Berechnung werden folgende vereinfachte Annahmen getroffen:

- Die Wasserdampfkonzentration der Umgebungsluft ändert sich während des Diffusionsprozesses nicht, d. h. $c_U = \text{konst.}$, bzw. $V_U = \infty$.
- Die Temperaturen außerhalb und innerhalb des Gehäuses sind gleich und konstant, d. h. $\vartheta_U = \vartheta_G = \text{konst.}$
- Im Gehäuse treten keine räumlichen Feuchtegradienten auf.

Die Gehäuseübertragungsfunktion ergibt sich im Laplace-Bereich zu

$$G_G(p) = \frac{\tilde{c}_G}{\tilde{c}_U} = \frac{1}{1 + C_L \cdot R_G \cdot p} \quad (4.7)$$

4 Einfluß der Luftfeuchte auf Präzisionsmeßgeräte

mit den Substitutionen

$$R_G = \frac{l}{D \cdot A} \text{ und } C_L = V_G.$$

Die Rücktransformation in den Zeitbereich liefert

$$g_G(t) = \frac{1}{R_G \cdot C_L} \exp\left(-\frac{t}{R_G \cdot C_L}\right), \text{ bzw.} \quad (4.8)$$

$$g_G(t) = \frac{1}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \text{ mit } \tau = R_G \cdot C_L = \frac{V_G \cdot l}{D \cdot A}. \quad (4.9)$$

Die Übergangsfunktion ergibt sich zu

$$h_G(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right). \quad (4.10)$$

Der nach dieser Methode errechnete zeitliche Diffusionsverlauf geht stets schneller vonstatten als der reale Diffusionsprozeß. Ursache hierfür sind die in der Realität existierenden Feuchtgradienten innerhalb des Gehäuses und in der Nähe der Gehäuseöffnungen.

4.2.2 Strömungsbedingter Feuchtetransport

Neben dem diffusiven Feuchtetransport zwischen der Umgebungsluft und dem Gehäuse eines Meßgerätes kann in der Realität je nach Gehäuseaufbau und Umgebungsbedingungen ein mehr oder weniger deutlich ausgeprägter strömungsbedingter Feuchtetransport existieren. Dieser ist jedoch zu sehr von den spezifischen Gegebenheiten abhängig, um ihn in ein allgemeingültiges Modell zu integrieren. Prinzipiell sollte man jedoch versuchen, Luftströmungen im Meßgerät zu unterdrücken. Dazu stehen verschiedene Möglichkeiten wie z. B.

- Vermeidung von Wärmequellen im Meßgerät,
- Reduzierung der Anzahl der Gehäuseöffnungen und
- möglichst ruhige Umgebungsluft

zur Verfügung.

In den folgenden beiden Abschnitten werden zwei Spezialfälle des strömungsbedingten Feuchtetransportes näher untersucht.

4.2.3 Temperaturbedingter Feuchtetransport

Eine Änderung der Lufttemperatur im Gehäuse eines Präzisionsmeßgerätes hat bei konstantem Luftdruck stets eine Luftströmung zwischen Gehäuse- und Umgebungsluft zur Folge. Unter der Annahme, daß sich Luft wie ein ideales Gas verhält, ändert sich das von der Luft eingenommene Volumen proportional zur Temperatur. Es gilt

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{konst.} \quad (4.11)$$

Demnach wird bei Temperaturänderungen eine bestimmte Menge Luftvolumen zwischen dem Gehäuseinneren und der Umgebung ausgetauscht. Dieser Volumenaustausch bringt zwangsläufig eine diffusionsunabhängige Konzentrationsänderung im Gehäuse mit sich.

Der Berechnungsansatz gilt wiederum unter der Annahme, daß im Gehäuse keine Temperatur- und Feuchtegradienten vorliegen.

Laut Heinze [10] beträgt die molare Masse von trockener Luft $M_{Luft} = 28,9645 \text{ g/mol}$. Daraus ergibt sich die spezielle Gaskonstante für trockene Luft zu $R_{Luft} = 287,0586 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$. Gleichung (4.12) wird auch als die gasspezifische Zustandsgleichung für Luft bezeichnet.

$$p \cdot V = m \cdot R_{Luft} \cdot T \quad (4.12)$$

Löst man Gleichung (4.12) nach T^{-1} auf und setzt das Verhältnis von Masse zu Volumen gleich der Dichte, so erhält man Gleichung (4.13) zur Bestimmung der Raumausdehnungszahl für trockene Luft. Unter Normalbedingungen ($\rho_{Luft} \approx 1,2 \text{ kg/m}^3$) ergibt sich

$$\gamma_{Luft} = \frac{\rho_{Luft} \cdot R_{Luft}}{p_0} = 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}. \quad (4.13)$$

Die Raumausdehnungszahlen für typische Gehäusematerialien wie Aluminium und Kunststoff (PVC) sind in [1] mit

$$\gamma_{Al} = 3 \cdot \alpha_{Al} = 7,14 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1} \text{ sowie}$$

$$\gamma_{PVC} = 3 \cdot \alpha_{PVC} = 2,40 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$$

angegeben.

Das heißt, daß die temperaturabhängige Volumenänderung der Luft unter konstantem Druck in etwa 50 mal größer ist als die Volumenänderung eines Aluminiumgehäuses. Für eine überschlägige Berechnung der temperaturbedingten Konzentrationsänderung genügt es demnach, lediglich das vom Gehäuse eingeschlossene Luftvolumen zu berücksichtigen.

Hat die Lufttemperatur im Gehäuse zum Zustand 1 einen Wert von T_1 , so ergibt sich die Masse der Luft im Gehäuse zu

$$m = \frac{V_G \cdot p}{R_{Luft} \cdot T_1}. \quad (4.14)$$

Diese Menge Luft beansprucht nach einer Temperaturänderung auf T_2 ein Volumen von

$$V_2 = \frac{m \cdot R_{Luft} \cdot T_2}{p} = V_G \cdot \frac{T_2}{T_1}, \quad (4.15)$$

falls der Druck während dieses Temperaturwechsels konstant bleibt.

Daraus ergibt sich ein mit der Umgebungsluft ausgetauschtes Volumen von

$$\Delta V = V_G - V_2 = V_G \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right). \quad (4.16)$$

Die Konzentration der Gehäuseluft beträgt somit

$$c_2 = c_1 + c_{\Delta V} \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right). \quad (4.17)$$

Hierbei ist $c_{\Delta V}$ die Konzentration des ausgetauschten Luftvolumens. Ist die Temperatur T_2 kleiner als die Temperatur T_1 , so strömt Luft in das Gehäuse und die Konzentration $c_{\Delta V}$ entspricht der Außenkonzentration. Im umgekehrten Fall ($T_2 > T_1$) muß man für $c_{\Delta V}$ die Ausgangskonzentration im Gehäuse c_1 einsetzen.

Beispiel:

Bei einer Ausgangsgehäusekonzentration von $c_1 = 15 \text{ g/m}^3$ und einer Temperaturänderung von $\vartheta_1 = 20^\circ\text{C}$ auf $\vartheta_2 = 30^\circ\text{C}$ ändert sich die Konzentration der Luft im Gehäuse auf $c_2 = 14,5 \text{ g/m}^3$.

Zu beachten ist, daß es sich hierbei um einen rein dynamischen Prozeß handelt. Falls durch die Temperaturänderung ein Konzentrationsunterschied zwischen Umgebung und Gehäuse aufgebaut wurde, so wird dieser durch die im vorigen Abschnitt beschriebenen Diffusionsvorgänge letztlich wieder ausgeglichen.

4.2.4 Druckbedingter Feuchtetransport

Ebenso wie Temperaturänderungen verursachen auch Änderungen des Luftdrucks einen Luftaustausch zwischen Gehäuse und Umgebung. Ausgehend von der Annahme, daß sich Luft wie ein ideales Gas verhält, ergibt sich die Masse der Luft im Gehäuse in Analogie zu Gleichung (4.14) zum Zeitpunkt 1 zu

$$m = \frac{V_G \cdot p_1}{R_{Luft} \cdot T}. \quad (4.18)$$

Herrscht zu einem Zeitpunkt 2 der Luftdruck p_2 , wobei die Temperatur unverändert ist, so nimmt diese Luft das Volumen

$$V_2 = \frac{m \cdot R_{Luft} \cdot T}{p_2} = V_G \cdot \frac{p_1}{p_2} \quad (4.19)$$

ein.

Daraus resultiert ein Austauschvolumen von

$$\Delta V = V_G - V_2 = V_G \left(1 - \frac{p_1}{p_2}\right). \quad (4.20)$$

Nach vollzogenem Volumenausgleich herrscht im Gehäuse die Konzentration

$$c_2 = c_1 + c_{\Delta V} \left(1 - \frac{p_1}{p_2}\right), \quad (4.21)$$

wobei $c_{\Delta V}$ die Konzentration der ausgetauschten Luft ist. Ist der Druck p_2 größer als der Druck p_1 , so strömt Luft in das Gehäuse und die Konzentration $c_{\Delta V}$ entspricht der Außenkonzentration. Im umgekehrten Fall ($p_2 < p_1$) muß man für $c_{\Delta V}$ die Ausgangskonzentration im Gehäuse c_1 einsetzen.

4.3 Experimentelle Untersuchung des Feuchtetransportes in ein Testgehäuse

4.3.1 Aufbau des Testgehäuses

Zur Überprüfung der angestellten theoretischen Betrachtungen wurde der Feuchtetransport in ein Testgehäuse experimentell untersucht. In Abbildung 4.9 ist der schematische Auf-

bau des Testgehäuses dargestellt. Es besteht aus einem quaderförmigen Glasgehäuse, welches durch einen Glasdeckel verschlossen werden kann. Zum kontrollierten Feuchtetransport zwischen dem Testgehäuse und der Umgebung befinden sich vier gleich große zylindrische Öffnungen im Gehäusedeckel. Wahlweise kann eine bestimmte Anzahl dieser Öffnungen verschlossen werden, um den Feuchtetransport zielgerichtet zu beeinflussen. Im Zentrum des Testgehäuses befindet sich ein kapazitiver Miniaturfeuchtesensor mit integriertem Platinwiderstandsthermometer vom Typ Hy-Cal IH 3602 C, wie im Abschnitt 3.2 beschrieben.

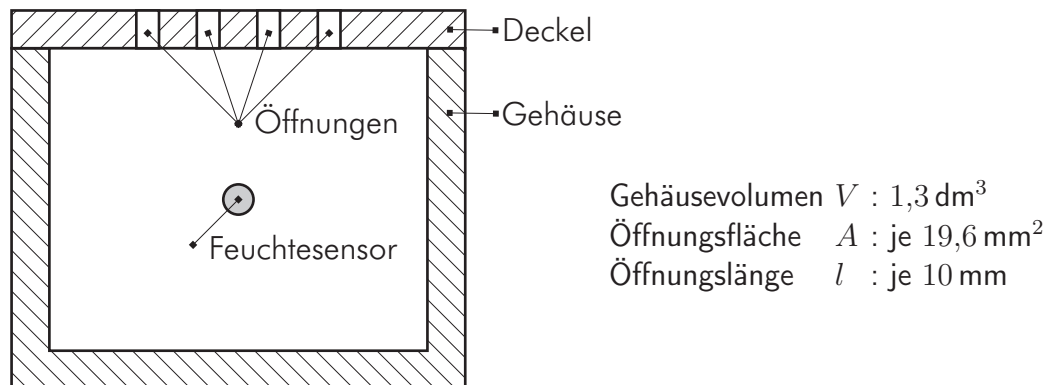


Abbildung 4.9: Schematische Darstellung des Testgehäuses

4.3.2 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

Das Testgehäuse wurde in einer Klimaprüfkammer Feuchtesprüngen bei zwei verschiedenen Temperaturen ausgesetzt. Der Einfluß des Luftdruckes konnte nur über die natürlichen Luftdruckschwankungen erfaßt werden. Im folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen bei den Extremfällen mit einfacher und mit vierfacher Öffnungsfläche im Deckel des Testgehäuses angegeben.

In Abbildung 4.10 sind die gemessenen zeitlichen Verläufe der Klimagrößen bei der Untersuchung mit einem aktiven Öffnungsloch im Deckel des Testgehäuses dargestellt. Bei der Auswertung der Meßergebnisse zeigte sich, daß der Verlauf der absoluten Feuchte im Testgehäuse im wesentlichen von dem Verlauf der absoluten Feuchte in der Klimaprüfkammer abhängt. Temperatur und Luftdruck spielen hierbei eine vernachlässigbare Rolle. Unter Berücksichtigung der in Gleichung (4.9) angegebenen Struktur der Gehäuseübertragungsfunktion wurde eine optimale Zeitkonstante von $\tau = 7,7$ h ermittelt. Als Optimalitätskriterium diente hierbei die Minimierung der Restquadratsumme. In Abbildung 4.11 sind der zeitliche Verlauf der absoluten Feuchte im Testgehäuse und der mittels angepaßter Gehäuseübertragungsfunktion errechnete Verlauf dargestellt. Die gute Übereinstimmung beider Kurven ist hierbei eine Bestätigung der vorausgesetzten Systemstruktur.

Die Messung des Feuchtetransportes bei vier aktiven Öffnungslöchern im Deckel des Testgehäuses lieferte prinzipiell vergleichbare Ergebnisse. Die Auswertung der gewonnenen Meßwerte erfolgte nach dem zuvor beschriebenen Schema. Durch die vierfache Öffnungsfläche bedingt geht der Feuchtetransport hierbei schneller vonstatten. Die optimale Zeitkonstante der Gehäuseübertragungsfunktion ergab sich zu $\tau = 1,5$ h.

4 Einfluß der Luftfeuchte auf Präzisionsmeßgeräte

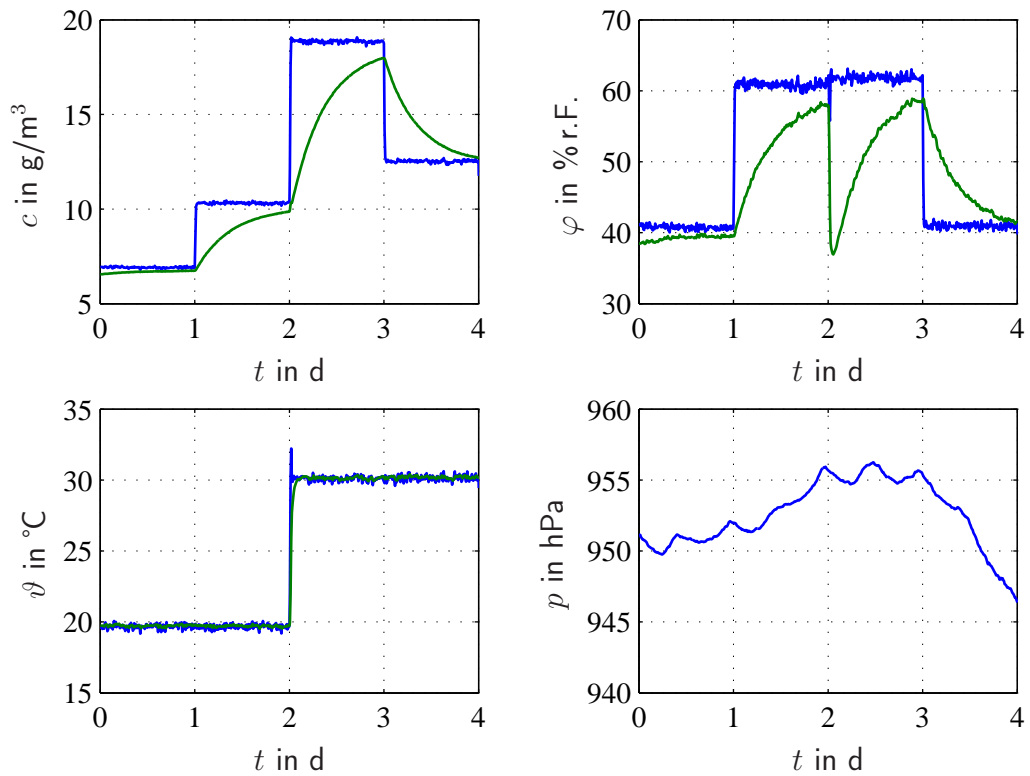


Abbildung 4.10: Zeitlicher Verlauf von Luftfeuchte, Temperatur und Luftdruck in der Klimaprüfkammer (—) und im Testgehäuse (—)

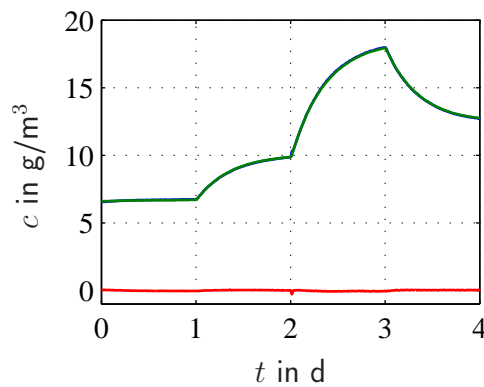


Abbildung 4.11: Zeitlicher Verlauf der absoluten Luftfeuchte im Testgehäuse (—) und modellierter Verlauf (—), Modellfehler (—)

4.3.3 Verifikation der theoretischen Betrachtungen anhand der experimentellen Untersuchungen

Bei den durchgeführten Experimenten betrug die mittlere Temperatur in der Klimaprüfkammer $\bar{\vartheta} \approx 25^{\circ}\text{C}$. Der Luftdruck schwankte um einen Wert von $\bar{p} \approx 950 \text{ hPa}$. Für diese beiden

Werte ergibt sich nach der Gleichung von Schirmer (2.13) ein mittlerer Diffusionskoeffizient von $\bar{D} = 0,1038 \text{ m}^2/\text{h}$. Mit den in Abschnitt 4.3.1 genannten geometrischen Daten des Testgehäuses lassen sich nach der in Gleichung (4.9) angegebenen Substitution die Zeitkonstanten für den diffusiven Feuchtetransport ermitteln. In Tabelle 4.3 sind die experimentell gewonnenen Zeitkonstanten den aus der vereinfachten Berechnung resultierenden Zeitkonstanten gegenübergestellt.

	Zeitkonstante	
	Experiment	Berechnung
1 Öffnungsloch	7,7 h	6,4 h
4 Öffnungslöcher	1,5 h	1,6 h

Tabelle 4.3: Zeitkonstanten für den Feuchtetransport am Testgehäuse aus experimentellen Untersuchungen und aus der vereinfachten Berechnung bei verschiedenen Öffnungsflächen

Der Vergleich dieser Zeitkonstanten läßt den Schluß zu, daß der Feuchtetransport zwischen der Umgebungsluft (Klimaprüfkammer) und dem Testgehäuse hauptsächlich auf Diffusion zurückzuführen ist. Weiterhin ist die gute Übereinstimmung der Zeitkonstanten eine Bestätigung für die Praxistauglichkeit der vereinfachten Berechnung.

Bei einem aktiven Öffnungsloch geht der reale Diffusionsprozeß langsamer vonstatten als das Ergebnis der vereinfachten Berechnung. Diese Erkenntnis deckt sich mit den angestellten theoretischen Betrachtungen, da bei der vereinfachten Berechnung die real existierenden Feuchtegradienten im Gehäuse vernachlässigt werden, wodurch der theoretische Diffusionsprozeß scheinbar schneller abläuft.

Läßt man den Feuchtetransport über alle vier Gehäuseöffnungen zu, so verbessert sich die Relation zwischen theoretisch und experimentell ermittelten Zeitkonstanten. Während die berechnete Zeitkonstante linear mit der Öffnungsfläche zusammenhängt, verringert sich die experimentell gewonnene Zeitkonstante ungefähr auf ein fünftel ihres Ausgangswertes. Dieser Effekt beruht im wesentlichen auf zwei Ursachen. Zum einen verringern sich die Feuchtegradienten im Gehäuse durch die gleichmäßig verteilten Öffnungslöcher im Deckel des Testgehäuses, was zu einer Verringerung des Fehlers der vereinfachten Berechnung führt. Zum anderen wird der Einfluß des strömungsbedingten Feuchtetransportes (Zwangslüftung der Klimaprüfkammer) mit größer werdender Öffnungsfläche spürbar. Hierbei ist allerdings anzumerken, daß die Strömungsgeschwindigkeit in der Klimaprüfkammer prinzipbedingt höher als die in gewöhnlichen Meßräumen ist.

Zusammenfassend ist festzuhalten, daß der aus experimentellen Untersuchungen ermittelte zeitliche Feuchtetransport gut mit dem diffusiven Feuchtetransport nach dem vorgestellten vereinfachten Berechnungsverfahren übereinstimmt. Somit bietet das Berechnungsverfahren einen sinnvollen Ansatz, um auf einfache Art und Weise eine Größenvorstellung vom zeitlichen Feuchtetransport zu gewinnen.

5 Methoden zur Reduzierung der Feuchteabhängigkeit von Präzisionsmeßgeräten

Zur Reduzierung der Feuchteabhängigkeit eines Präzisionsmeßgerätes gibt es zwei unterschiedliche Ansätze. Es ist möglich,

1. den für die Feuchteabhängigkeit verantwortlichen Feuchtetransport zu minimieren oder,
2. basierend auf der Kenntnis der Feuchteabhängigkeit, die Auswirkungen der Feuchteänderungen auf das Meßergebnis zu kompensieren. Dieser Ansatz wird auch als mathematische Feuchtekompensation bezeichnet und im Abschnitt 5.3 ausführlich abgehandelt.

Die in Punkt 1. genannte Minimierung des Feuchtetransportes läßt sich beispielsweise durch

- Konstanthaltung der Umgebungsfeuchte – im Idealfall Betrieb unter trockener Atmosphäre,
- ein feuchtedichtes Gehäuse des Präzisionsmeßgerätes,
- Konstanthaltung der Feuchte im Gehäuse des Meßgerätes, z. B. mittels Feuchtepuffer (Abschnitt 5.1) und
- Minimierung der Beladung feuchtesensibler Bauteile (Abschnitt 5.2)

erreichen.

Im Kapitel 3 wurden bereits verschiedene Möglichkeiten zur Erzeugung definierter Luftfeuchten vorgestellt. Diese sind ebenso zur Konstanthaltung der Feuchte im Meßraum geeignet. Aus diesem Grund beschränken sich die Ausführungen in diesem Kapitel auf eine Variante zur Stabilisierung der relativen Feuchte im Gehäuse des Präzisionsmeßgerätes.

Die Minimierung der Beladung der feuchtesensiblen Bauteile kann durch den Einsatz feuchtoptimaler Materialien, d. h. Materialien mit geringer Feuchteaufnahme und Feuchtedurchlässigkeit, bzw. durch feuchtegerechte Konstruktion von Baugruppen und Einzelbauteilen erfolgen.

Durch einen symmetrischen Aufbau kann erreicht werden, daß sich Feuchtwirkungen gegenseitig aufheben. Dieser Effekt wird beispielsweise bei Waagen, die mittels Dehnungsmeßstreifen die Verformung eines Federkörpers detektieren, ausgenutzt. Verschaltet man vier

Dehnungsmeßstreifen in einer Vollbrücke, so wird die Waagenanzeige nicht durch den Absolutwert der Feuchteabhängigkeit der einzelnen Dehnungsmeßstreifen, sondern lediglich durch die Unterschiede in deren Feuchteverhalten beeinflusst.

Welche der genannten Möglichkeiten zur Reduzierung der Feuchteabhängigkeit eines Präzisionsmeßgerätes zum Einsatz kommt, hängt von verschiedenen Faktoren (Kosten, Bauraum, Gehäusedurchführungen und weitere) ab und muß für jeden Anwendungsfall geprüft werden. Praktisch ist es kaum möglich, ein im Rahmen der Meßauflösung feuchteunabhängiges Präzisionsmeßgerät durch Umsetzung eines der genannten Ansätze zu erhalten. Demzufolge ist eine Kombination unterschiedlicher Varianten zur Reduzierung der Gesamtheuchteabhängigkeit sinnvoll.

5.1 Einsatz von Puffermaterialien zur Stabilisierung der Gehäusefeuchte

Wie im Abschnitt 4.1 gezeigt wurde, hängt die Feuchteabhängigkeit eines Meßgerätes eng mit der relativen Luftfeuchte im Gehäuse des Meßgerätes zusammen. Ein Ansatz zur Verringerung der Feuchteabhängigkeit ist demnach die Konstanthaltung der relativen Luftfeuchte im Gehäuse. Eine einfache Variante zur Stabilisierung der Gehäusefeuchte basiert auf dem Einsatz von sogenannten Puffermaterialien. Dieses Prinzip der Feuchtepufferung wird seit längerer Zeit in Museen zur Stabilisierung der Feuchte in Vitrinen und somit zum Schutz von Kunstwerken erfolgreich angewendet. Ein Beispiel zur Umsetzung dieses Prinzips in der Präzisionsmeßtechnik ist das patentierte Verfahren der Firma Setra zur Feuchtepufferung der Luft in einem Waagengehäuse mit speziellen geometrischen Rahmenbedingungen [29].

5.1.1 Modell eines Gehäuses mit Puffermaterial

In Anlehnung an die Betrachtungen zum Feuchtetransport zwischen Meßgerät und Umgebung (Abschnitt 4.2, Seite 43 ff) ist in Abbildung 5.1 das elektrische Ersatzschaltbild eines feuchtegepufferten Gehäuses dargestellt. Das Puffermaterial wirkt hierbei als Kapazität C_B , die über den Widerstand R_B be- und entladen werden kann. Eine optimale Pufferwirkung wird mit großer Pufferkapazität bei kleinem Widerstand erzielt.

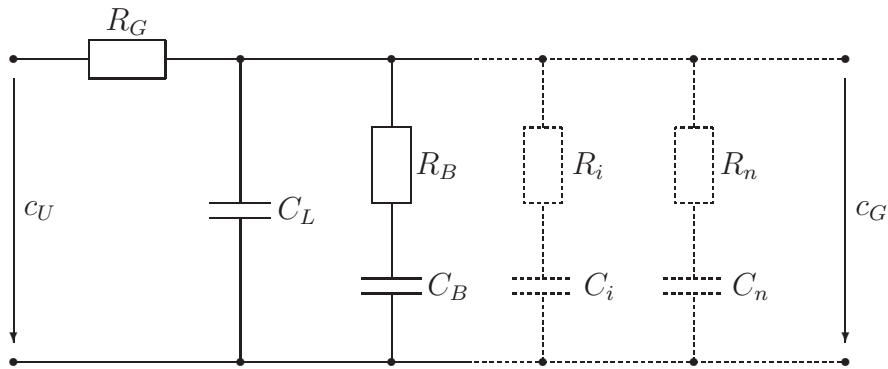


Abbildung 5.1: Elektrisches Ersatzschaltbild eines Gehäuses mit Puffermaterial und mit n feuchtaufnehmenden Bauteilen

- c_U, c_G : Feuchtekonzentration der Umgebungs- bzw. Gehäuseluft
 C_B : Feuchtekapazität des Puffermaterials – Pufferkapazität (als äquivalentes Luftvolumen)
 C_i, C_n : Feuchtekapazität des i -ten bzw. n -ten Bauteils
 C_L : Feuchtekapazität (Volumen) der Luft im Gehäuse
 R_B : Diffusionswiderstand des Puffermaterials – Pufferwiderstand
 R_G : Widerstand des Gehäuses (der Gehäuseöffnungen) gegenüber der Wasserdampfdiffusion – Gehäusewiderstand
 R_i, R_n : Diffusionswiderstand des i -ten bzw. n -ten Bauteils

5.1.2 Berechnung der Luftfeuchte in einem feuchtegepufferten Gehäuse ohne feuchtaufnehmende Bauteile

In Abbildung 5.2 ist ein vereinfachtes elektrisches Ersatzschaltbild eines Gehäuses mit Puffermaterial dargestellt. Als Vereinfachung wird hierbei angenommen, daß außer dem Puffermaterial keine weiteren feuchtaufnehmenden Bauteile im Gehäuse vorhanden sind. Diese Vereinfachung ist in fast allen Fällen zulässig, da die Feuchtekapazität des Puffermaterials zumeist einige Größenordnungen höher als die anderer Bauteile ist. Somit wird der Einfluß anderer Bauteile auf die Gehäusefeuchte irrelevant. In der folgenden Berechnung wird nur der diffusive Feuchtetransport berücksichtigt.

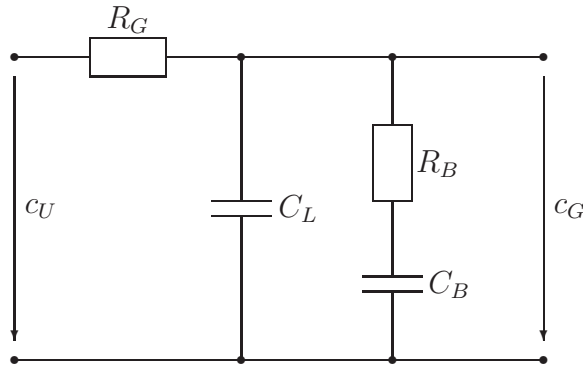


Abbildung 5.2: Elektrisches Ersatzschaltbild eines Gehäuses mit Puffermaterial und ohne feuchteaufnehmende Bauteile

Als Rahmenbedingungen gelten wiederum die in Abschnitt 4.2.1.2 (Seite 46 ff) getroffenen Vereinbarungen. Die Gehäuseübertragungsfunktion läßt sich aus der Spannungsteilerregel ableiten und ergibt sich im Laplace-Bereich zu

$$G(p) = \frac{\tilde{c}_G}{\tilde{c}_U} = \frac{\left(R_B + \frac{1}{pC_B}\right) \frac{1}{pC_L}}{R_G + \frac{\left(R_B + \frac{1}{pC_B}\right) \frac{1}{pC_L}}{R_B + \frac{1}{pC_B} + \frac{1}{pC_L}}}. \quad (5.1)$$

Durch geeignetes Umformen ergibt sich hieraus

$$G(p) = \frac{pC_BR_B + 1}{p^2C_BC_LR_BR_G + p(C_BR_B + C_BR_G + C_LR_G) + 1}, \quad (5.2)$$

bzw.

$$G(p) = \alpha_1 \cdot \frac{p + \alpha_2}{(p + \alpha_3)(p + \alpha_4)} \quad (5.3)$$

mit den Substitutionen

$$\alpha_1 = \frac{1}{R_GC_L}$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{R_BC_B}$$

$$\alpha_3 = \frac{R_GC_L + R_GC_B + R_BC_B}{2R_GR_BC_LC_B} - \sqrt{\left(\frac{R_GC_L + R_GC_B + R_BC_B}{2R_GR_BC_LC_B}\right)^2 - \frac{1}{R_GR_BC_LC_B}}$$

$$\alpha_4 = \frac{R_GC_L + R_GC_B + R_BC_B}{2R_GR_BC_LC_B} + \sqrt{\left(\frac{R_GC_L + R_GC_B + R_BC_B}{2R_GR_BC_LC_B}\right)^2 - \frac{1}{R_GR_BC_LC_B}}.$$

Die Rücktransformation in den Zeitbereich liefert die Gewichtsfunktion der Gehäusekonzentration

$$g(t) = \alpha_1 \frac{(\alpha_2 - \alpha_3) \exp(-\alpha_3 t) - (\alpha_2 - \alpha_4) \exp(-\alpha_4 t)}{\alpha_4 - \alpha_3}. \quad (5.4)$$

Die Sprungantwort der Gehäusekonzentration ergibt sich zu

$$h(t) = 1 + \alpha_1 \frac{\left(1 - \frac{\alpha_2}{\alpha_3}\right) \exp(-\alpha_3 t) - \left(1 - \frac{\alpha_2}{\alpha_4}\right) \exp(-\alpha_4 t)}{\alpha_4 - \alpha_3}. \quad (5.5)$$

5.1.3 Simulation der Feuchtekonzentration im Gehäuse bei variierenden Gehäuseparametern

Auf der Grundlage des im vorherigen Abschnitt vorgestellten Modells soll an dieser Stelle ein Eindruck über die konkrete Pufferwirkung anhand eines fiktiven Gehäuses vermittelt werden. Dieses Gehäuse besitzt ein Volumen von $V = 1 \text{ dm}^3$ und eine Wandstärke von $l = 2 \text{ mm}$. Um die Wirkung von Modifikationen beurteilen zu können, wurden die Gehäuseparameter:

1. Gehäusewiderstand R_G ,
2. Pufferkapazität C_B und
3. Pufferwiderstandes R_B

getrennt voneinander variiert. Der mittlere Gehäusewiderstand beträgt $R_G \approx 4240 \text{ h/m}^3$. Dieser Wert ergibt sich nach Gleichung (4.5) bei der vorgegebenen Wandstärke von $l = 2 \text{ mm}$, einer Öffnungsfläche von $A = 5 \text{ mm}^2$ und einem Wasserdampfdiffusionskoeffizienten in Luft von $D = 0,0944 \text{ m}^2/\text{h}$ (siehe Seite 46).

Für die mittlere Pufferkapazität wurde ein Wert von $C_B = 2 \text{ m}^3$ angesetzt. Dieser Wert entspricht einer Menge von circa 100 g Silikagel (siehe Abschnitt 5.1.4).

Der verwendete Wert für den mittleren Pufferwiderstand von $R_B = 100 \text{ h/m}^3$ basiert auf dem Ergebnis experimenteller Untersuchungen.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Reaktion der Konzentration im Gehäuse auf eine sprunghafte Änderung der Umgebungsfeuchte um 1 g/m^3 für einen Zeitraum von $t = 1 \text{ d}$ und $t = 100 \text{ d}$. Durch diese beiden Angaben kann sowohl die kurzzeitige als auch die langfristige Pufferwirkung beurteilt werden. Weiterhin ist der Amplitudenfrequenzgang der jeweiligen Gehäuseübertragungsfunktion dargestellt.

1. Variation des Gehäusewiderstandes

Die Variation des Gehäusewiderstandes erfolgte über eine Variation der Öffnungsfläche des Gehäuses nach Gleichung (4.5), da die Wandstärke als konstant angenommen wurde. Die Gehäusekonzentration wurde für die Gehäuseöffnungsflächen $A = [50 \quad 5 \quad 0,5] \text{ mm}^2$ errechnet.

In Abbildung 5.3 ist zu erkennen, daß die Beeinflussung der Gehäusefeuchte durch die Umgebungsfeuchte mit kleiner werdender Öffnungsfläche des Gehäuses abnimmt. Auch bei einer

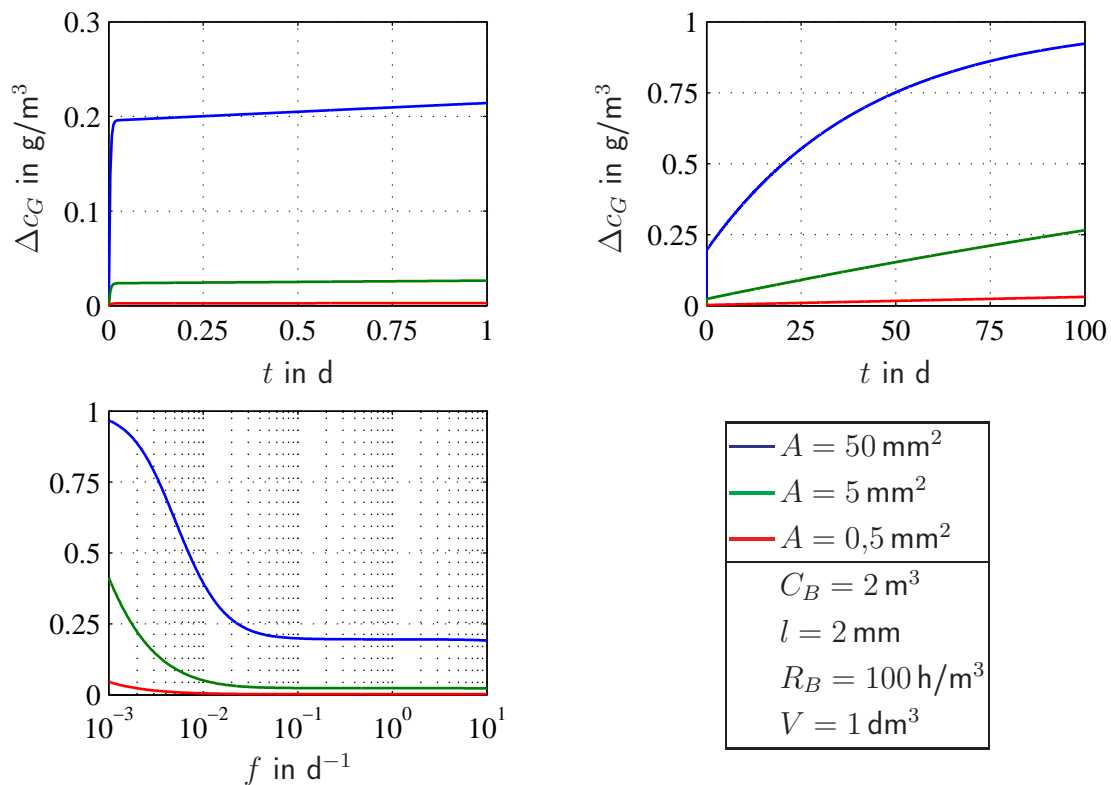


Abbildung 5.3: Gehäusekonzentration bei variierender Gehäuseöffnungsfläche

Öffnungsfläche von $A = 5 \text{ mm}^2$ wird kurzzeitig und langfristig noch eine gute Stabilisierung der Gehäusefeuchte infolge der Feuchtepufferung erzielt.

2. Variation der Pufferkapazität

Die Vergrößerung der Pufferkapazität, d. h. die Erhöhung der Menge des Puffermaterials, liefert bei den gewählten Gehäuseparametern erst langfristig eine bessere Stabilisierung der Gehäusefeuchte. Die in Abbildung 5.4 (oben links) zu erkennende, nahezu unmittelbare Änderung der Gehäusefeuchte auf einen Wert von $c_G \approx 0,025 \text{ g/m}^3$ resultiert aus dem Zusammenspiel von Gehäuse- und Pufferwiderstand und ist unabhängig von der Menge des Puffermaterials. Erstaunlich ist, daß auch mit einer geringen Pufferkapazität von $C_B = 0,2 \text{ m}^3$ (entspricht circa 10 g Silikagel) eine gute kurzzeitige Stabilisierung der Gehäusefeuchte erzielt werden kann.

5 Methoden zur Reduzierung der Feuchteabhängigkeit von Präzisionsmeßgeräten

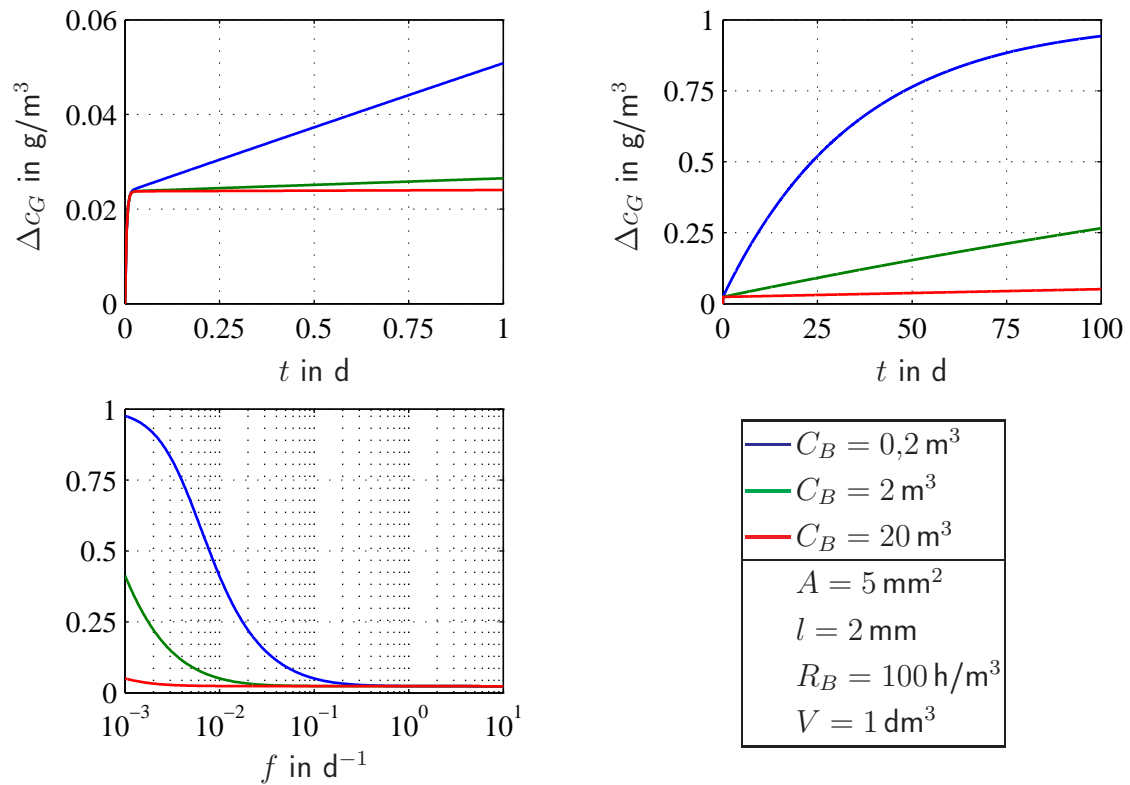


Abbildung 5.4: Gehäusekonzentration bei variierender Pufferkapazität

3. Variation des Pufferwiderstandes

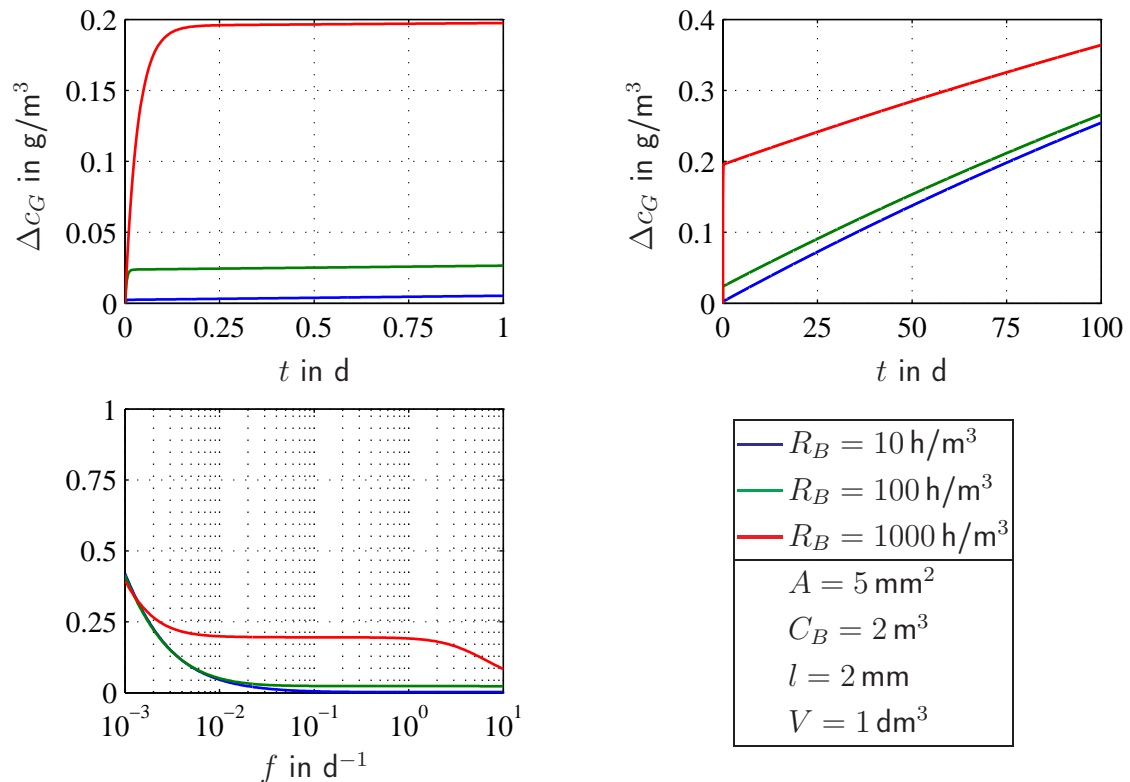


Abbildung 5.5: Gehäusekonzentration bei variierendem Pufferwiderstand

Entscheidenden Einfluß auf die kurzzeitige Pufferung der Gehäusefeuchte hat die Größe des Pufferwiderstandes (siehe Abbildung 5.5). Er wird durch die Größe der unmittelbaren Kontaktfläche von Puffermaterial und Gehäuseluft bestimmt. Eine große Kontaktfläche ermöglicht einen schnellen Feuchtetransport zwischen der Gehäuseluft und dem Puffermaterial und stellt somit einen kleinen Pufferwiderstand dar.

5.1.4 Silikagel als Feuchtepuffer

Ein zur Feuchtestabilisierung in Gehäusen sehr gut geeignetes Material ist Silikagel. Neben einer hohen Wasseraufnahmefähigkeit ist es preisgünstig, ungiftig und unaggressiv gegenüber anderen Werkstoffen. Je nach Einsatzbereich sind verschiedene Arten von Silikagel erhältlich, die sich in chemischen und vor allem in physikalischen Eigenschaften wie innere Oberfläche, Porendurchmesser, Porenvolumen und Rüttelgewicht unterscheiden. Der zu Trocknungs- und Feuchtestabilisierungszwecken am häufigsten eingesetzte Typ ist Silikagel E. Zur Applikation in Gehäusen eignet sich kugelförmiges Silikagel, da durch dieses ein guter Feuchteaustausch gewährleistet wird. Weiterhin ist die mechanische Stabilität der Kugeln recht hoch, so daß die Verschmutzung des Meßgerätes durch Silikagelabrieb gering gehalten werden kann. In Tabelle 5.1 sind ausgewählte Eigenschaften von Silikagel E zusammengestellt [7].

innere Oberfläche	750 m ² /g
mittlerer Porendurchmesser	2,0 nm
Porenvolumen	0,37 ml/g
Rüttelgewicht	0,8 kg/l
spezifische Wärmekapazität	1 kJ/(kg·K)
Wärmeleitfähigkeit	0,2 W/(m·K)

Tabelle 5.1: Eigenschaften von Silikagel E

Silikagel E besteht zu 97 % aus SiO₂ und zu 3 % aus Al₂O₃. Es wird aus Natriumsilikat und einer Mineralsäure (z. B. Schwefelsäure) durch Mischen unter definierten Bedingungen, anschließendem Auswaschen von Natriumsulfat und Trocknen des dadurch entstandenen Hydrogels synthetisiert. Die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften von Silikagel werden durch spezielle Prozeßführung des Waschvorgangs erzielt [31].

„Blaugel“ hat die gleichen physikalischen Eigenschaften wie Silikagel E. Als Feuchtigkeitsindikator wird Kobalt-II-Chlorid zugesetzt, wodurch sich bei (statischen) relativen Feuchten von (20...40) % r.F. ein Farbumschlag von blau über violett nach hellrosa vollzieht.

In Abbildung 5.6 ist die Sorptionsisotherme von Silikagel E dargestellt. Diese wurde nach der BDDT-Sorptionsisothermengleichung (2.28) mit den von Jokisch [15] angegebenen Parametern für eine Temperatur von 25°C berechnet. Eigene experimentelle Untersuchungen bestätigten dieses Sorptionsverhalten.

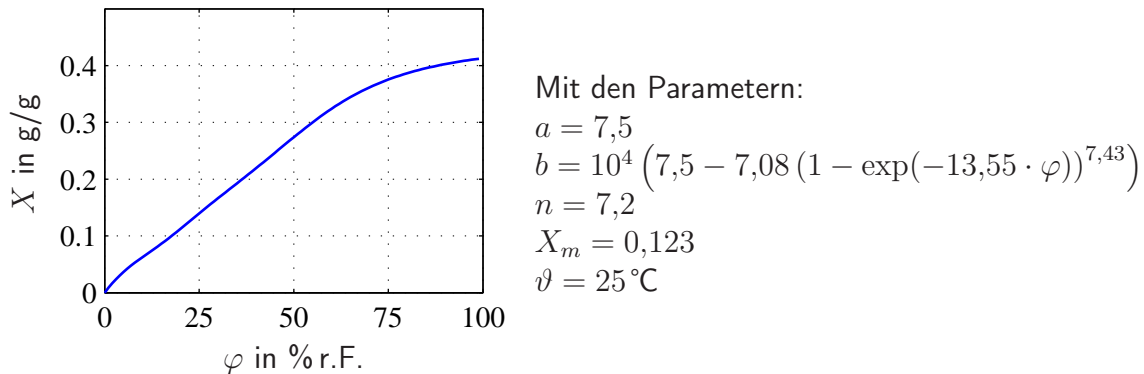


Abbildung 5.6: Sorptionsisotherme von Silikagel E

Aus der Sorptionsisothermengleichung läßt sich nach Gleichung (4.6) (Seite 46) die Feuchtekapaazität berechnen. In Abbildung 5.7 ist die massebezogene spezifische Feuchtekapaazität von Silikagel E für eine Temperatur von 25°C angegeben. Für einen Bereich der relativen Feuchte zwischen (20...80) % r.F. beträgt diese im Mittel 23 m³/kg. Dieser Wert bedeutet, daß eine Masse von einem Kilogramm Silikagel E die gleiche Menge Wasserdampf wie 23 m³ Luft speichern kann.

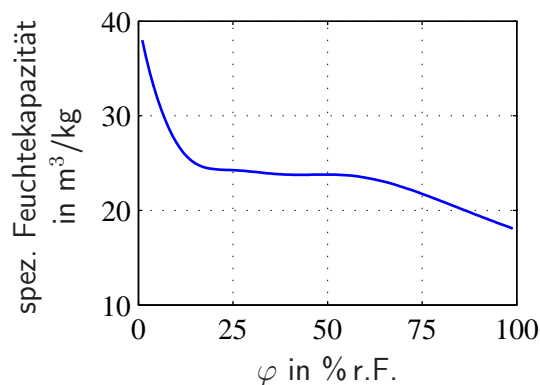


Abbildung 5.7: Massebezogene spezifische Feuchtekapaazität von Silikagel E

Der Pufferwiderstand hängt vom Verhältnis der Silikagelmasse zur aktiven Silikageloberfläche ab. Um die bestmögliche Pufferwirkung zu erzielen ist es sinnvoll, das Silikagel auf einer möglichst großen Fläche zu verteilen.

5.1.5 Art-Sorb-Platten als Feuchtepuffer

Durch die Zugabe von Lithiumchlorid läßt sich die Empfindlichkeit der Sorptionsisotherme von Silikagel bei hohen Feuchten deutlich vergrößern. Eine solche Kombination von Silikagel und Lithiumchlorid wird derzeit von der Firma „Christoph Waller, Long Life for Art“ unter dem Namen Art-Sorb in verschiedenen Applikationsformen vertrieben [31].

Besonders vorteilhaft ist die Verfügbarkeit in Plattenform. Die Platten haben eine Dicke von 1,8 mm und lassen sich problemlos schneiden. Somit ist häufig eine unkomplizierte Unterbringung an den Gehäusewänden ohne Modifikationen der Gehäusegeometrie möglich. Besteht ein direkter Kontakt zwischen Art-Sorb und Metallen (besonders Aluminium) können bei hohen Luftfeuchten Korrosionserscheinungen an der Metalloberfläche auftreten. Eigene Langzeituntersuchungen bei Luftfeuchten bis 85 % r.F. und Temperaturen bis 25 °C lieferten keine sichtbaren Schädigungen. Bei Feuchten nahe 100 % r.F. waren nach kurzer Zeit Korrosionserscheinungen an Aluminiumoberflächen zu beobachten.

Der Einsatz von Art-Sorb-Platten zur Pufferung der Gehäusefeuchte ist somit nur empfehlenswert, wenn sichergestellt ist, daß die Umgebungsfeuchte eine obere Grenze von circa 85 % r.F. nicht überschreitet.

5.1.6 Entwicklungstendenzen bei feuchtepuffernden Materialien

Auch bei den Puffermaterialien ist eine ständige Weiterentwicklung zu verzeichnen. Der Trend geht hierbei zu einem immer größeren feuchteproportionalen Speichervermögen. Besonders interessant könnte die von der Firma „Christoph Waller, Long Life for Art“ angekündigte Variante von lithiumchloridfreien Silikagelplatten werden.

Von der Firma „Concrom“ werden Silikagelformteile als Festkörper mit verschiedenen Geometrien hergestellt. Diese stellen aus fertigungstechnischer Sicht wegen ihrer guten Applizierbarkeit eine günstige Variante zum Einbau in Gehäuse dar. Die Eignung zur Feuchtepufferung konnte jedoch noch nicht experimentell untersucht werden.

5.1.7 Untersuchungen zur Feuchtepufferung an einem Testgehäuse

Zur Überprüfung der Pufferwirkung von Silikagel und den durchgeführten Modellrechnungen wurde in das im Abschnitt 4.3.1 (Seite 50 ff) beschriebene Testgehäuse eine Menge von 100 g Silikagel E in Kugelform eingebracht. Diese entspricht einer Pufferkapazität von $C_B = 2,3 \text{ m}^3$. Bei der durchgeführten Untersuchung konnte der Feuchteaustausch zwischen dem Testgehäuse und der Umgebung (Klimaprüfkammer) über alle vier Öffnungslöcher im Deckel des Testgehäuses stattfinden. Somit wurde der zur Feuchtepufferung ungünstigste Fall ausgewählt. Der Gehäusewiderstand ergibt sich hierbei nach Gleichung (4.5) zu $R_G = 1350 \text{ h/m}^3$. Die Feuchtekapazität der Gehäuseluft entspricht dem Gehäusevolumen und beträgt $C_L = 1,3 \text{ dm}^3$.

Mit diesen Feuchteparametern sollte sich laut der im Abschnitt 5.1.2 vorgestellten Modellierung eine sehr stabile Feuchte im Testgehäuse einstellen.

Um eine Vergleichbarkeit der Meßergebnisse mit denen der Untersuchungen ohne Puffermaterial zu gewährleisten, wurde der gleiche Klimaverlauf realisiert. Die Zykluszeit je Klima betrug in Anlehnung an den natürlichen Tag-Nacht-Rhythmus 12 h.

In Abbildung 5.8 sind die gemessenen zeitlichen Verläufe der Klimagrößen bei der Untersuchung dargestellt. Hierbei ist zu erkennen, daß die relative Feuchte im Testgehäuse nahezu unabhängig vom Verlauf der Feuchte in der Klimaprüfkammer einen konstanten Wert von cir-

5 Methoden zur Reduzierung der Feuchteabhängigkeit von Präzisionsmeßgeräten

ca 20 % r.F. besitzt. Ihre Standardabweichung beträgt lediglich 1 % r.F. Demzufolge verläuft die absolute Feuchte in dem Testgehäuse im wesentlichen proportional zur Temperatur.

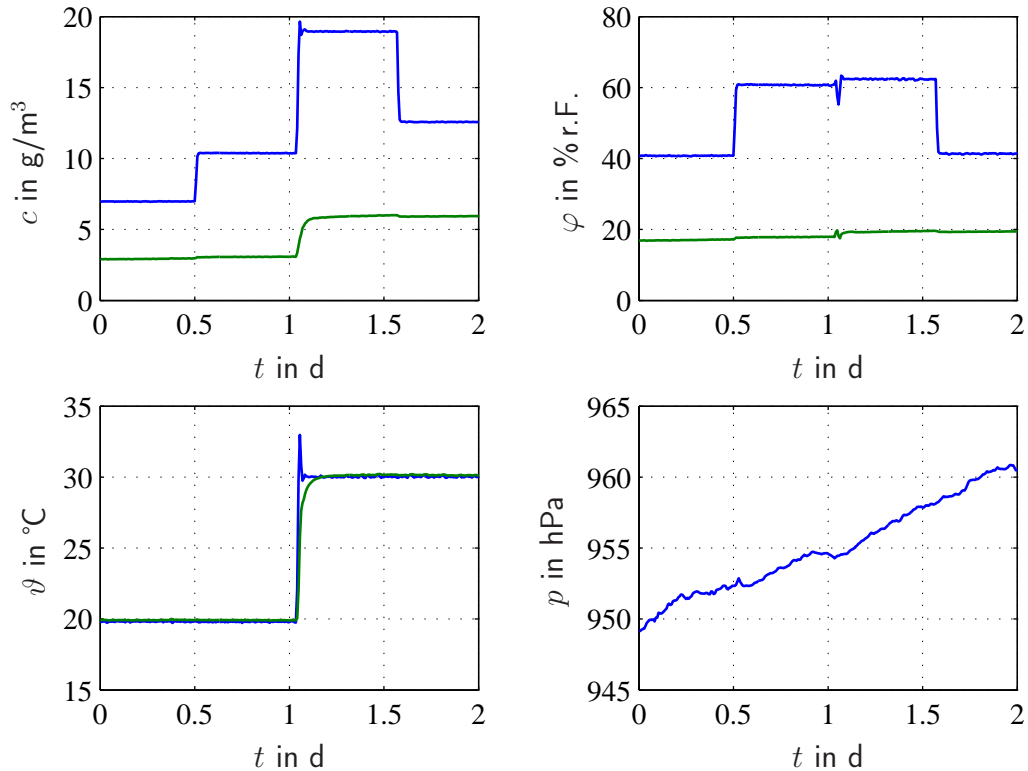


Abbildung 5.8: Zeitlicher Verlauf von Luftfeuchte, Temperatur und Luftdruck in der Klimaprüfkammer (—) und im Testgehäuse (—)

Die verbleibenden Schwankungen der relativen Feuchte im Testgehäuse können durchaus mit der im Abschnitt 3.2 spezifizierten Meßunsicherheit des verwendeten Feuchtesensors begründet werden. Trotz sorgfältiger Kalibrierung des Feuchtefühlers am Walz Tauspiegelhygrometer sind dynamische und temperaturbedingte Feuchtemeßfehler in der Größenordnung von 1 % r.F. durchaus möglich.

Der Mittelwert der relativen Feuchte im Testgehäuse von 20 % r.F. resultiert aus der Anfangsbeladung des Silikagels.

Zur besseren Verdeutlichung der Pufferwirkung des Silikagels sind in Abbildung 5.9 die zeitlichen Feuchteverläufe im gepufferten und im ungepufferten Testgehäuse gemeinsam dargestellt.

Die Abschätzung des tatsächlich vorhandenen Pufferwiderstandes ist schwierig, da der Verlauf der relativen Feuchte im gepufferten Gehäuse fast keine Schwankungen aufweist. Setzt man in Gleichung (5.4) einen Wert von $R_B = 40 \text{ h/m}^3$ ein, so erhält man eine gute Übereinstimmung zwischen Modell und Meßwerten. Diese Angabe gilt selbstverständlich nur für die vorhandene Verteilung des Silikagels auf einer Fläche von circa 130 cm^2 .

Um den Gehäusewiderstand genauer zu ermitteln, wäre eine experimentelle Untersuchung mit einer Zykluszeit von deutlich mehr als 12 h nötig.

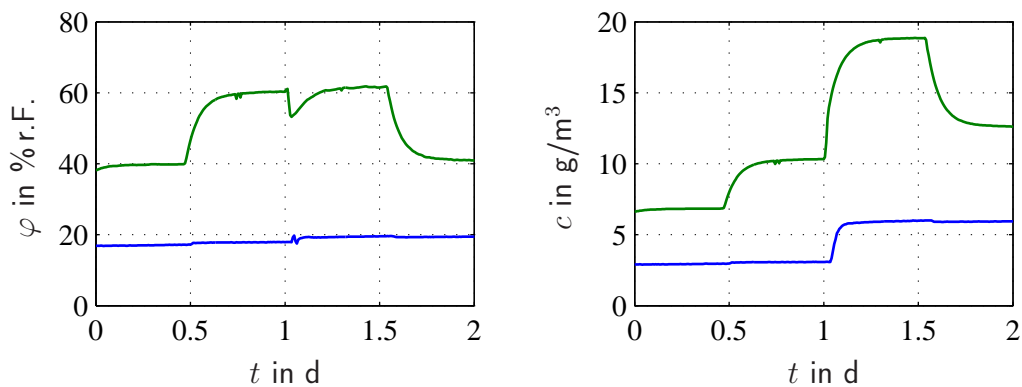


Abbildung 5.9: Zeitlicher Verlauf von relativer Feuchte (links) und absoluter Feuchte (rechts) im Testgehäuse mit Silikagelpufferung (—) und ohne Silikagelpufferung (—)

5.2 Konstruktive Möglichkeiten zur Reduzierung des Feuchteverhaltens von Einzelbauteilen

Bei der Konstruktion von Präzisionsmeßgeräten sollte der Einsatz von Werkstoffen mit erhöhtem Wasseraufnahmevermögen (Kunststoffe, Klebstoffe, Keramik und weitere) an funktionsrelevanten Baugruppen prinzipiell vermieden werden.

Krause gibt in [21, S. 307 ff] verschiedene Hinweise zur feuchtegerechten Konstruktion von mechanischen und elektrischen Baugruppen an.

Falls die für die Feuchteabhängigkeit hauptverantwortlichen Bauteile bekannt sind, stehen verschiedene konstruktive Möglichkeiten zur Verfügung, um die Beladungsänderungen dieser Bauteile gezielt zu minimieren. Je nach Aufbau des Bauteils und dessen Feuchtwirkung muß die richtige Methode ausgewählt werden.

5.2.1 Kapselung

Das entsprechende Bauteil wird durch ein zusätzliches feuchtedichtetes Gehäuse (Kapsel) vom eigentlichen Gehäuse des Meßgerätes abgetrennt. In dieser Kapsel kann sich neben dem Bauteil auch Luft befinden. Die meisten Bauteile stehen in gewisser Weise mit anderen Bauteilen des Meßgerätes in Verbindung (elektrisch, optisch oder mechanisch). Hierbei besteht generell das Problem der feuchtedichten Durchführung. Für elektrische Verbindungen sind im Handel kontaktierte Glasdurchführungen erhältlich. Vor allem bei mechanischen Verbindungen ist eine Kapselung wegen des enormen Aufwandes in den meisten Fällen nicht zweckmäßig. Wirkt sich die feuchteabhängige Beladung eines Bauteils beispielsweise nur über dessen Masseänderung auf die Anzeige des untersuchten Präzisionsmeßgerätes aus, so ist eine feuchtedichte Kapselung sinnvoll. Durch die Kapselung ist sichergestellt, daß die Gesamtmasse von Bauteil und eingeschlossener Luft konstant bleibt. Hat die feuchteabhängige Beladung eine Widerstands- bzw. Kapazitätsänderung zur Folge, so ist eine Kapselung nur bedingt sinnvoll, da sich mit Änderung der Temperatur die Beladung des Bauteils und somit die relative

5 Methoden zur Reduzierung der Feuchteabhängigkeit von Präzisionsmeßgeräten

Feuchte in der Kapselung ändert. Die Feuchtwirkung wird hierbei in das Temperaturverhalten des Bauteils transformiert und nicht beseitigt. Besonders kritisch sind Betauungen in der Kapselung. Feuchtedichte Kapselungen mit trockenem Schutzgas sind denkbar, jedoch muß das zu kapselnde Bauteil ebenfalls vollkommen trocken sein. Besser wäre in diesem Fall eine Abdichtung bzw. Versiegelung, die den Feuchteaustausch zwischen Bauteil und Luft verhindert.

Beispiel: Kapselung der Kompensationsspule in Waagen nach dem Prinzip der elektromagnetischen Kraftkompensation

Zur hochgenauen Massebestimmung findet derzeit das Prinzip der elektromagnetischen Kraftkompensation, auch *EMK* genannt, Anwendung [33]. Hierbei befindet sich beispielsweise auf der einen Seite eines Hebelsystems das Wägegut und auf der anderen Seite ein Spule-Permanentmagnet-System zur Erzeugung einer äquivalenten Gegenkraft zur Gewichtskraft des Wägeguts. Über einen sogenannten Nullageindikator wird die Auslenkung des Hebelsystems registriert und durch Regelung des Spulenstromes minimiert. Der Spulenstrom ist somit ein Maß für die Gewichtskraft des Wägeguts.

Die Spule besteht aus vielen Windungen Kupferlackdraht. Nimmt dieser Lackdraht Wasser auf, so vergrößert sich die Masse der Spule und somit ihre Gewichtskraft. Da diese zusätzliche Gewichtskraft ebenfalls ein Gegengewicht zum Wägegut darstellt, wird eine geringere magnetische Kraft benötigt, um das Hebelsystem in der Nullage zu halten. Der Fehler der Wägung ergibt sich aus dem negativen Produkt der, von der Spule aufgenommenen, Wassermasse und dem vorhandenen Hebelverhältnis.

Durch eine Kapselung der Spule kann der Feuchtetransport zwischen dem Lackdraht und der Luft im Waagengehäuse stark reduziert werden. Somit ändert sich die Gesamtmasse der gekapselten Spule bei Änderungen der Gehäusefeuchte nur sehr wenig und sehr langsam. Abbildung 5.10 zeigt die gekapselte Kompensationsspule einer als Seriengerät erhältlichen



Abbildung 5.10: Gekapselte Kompensationsspule einer Mikrowaage

Mikrowaage. Das Kapselgehäuse besteht aus Aluminium, wobei die Verbindungsstellen zwischen Spulenträger und Kapselung durch einen speziellen Klebstoff abgedichtet werden. Diese Variante ist keine feuchtegerechte Ideallösung, stellt aber einen guten Kompromiß zwischen Kostenaufwand und Reduzierung der Wasseraufnahme der Spule dar.

Der beschriebene Effekt der Wasseraufnahme der Kompensationsspule ist ein sogenannter Nullpunktseffekt, d. h. er beeinflusst unabhängig von der Masse des Wägeguts den Nullpunkt

der Waagenkennlinie.

In experimentellen Untersuchungen wurde die Wasseraufnahme von ungekapselten und gekapselten Spulen ermittelt. Diese Wasseraufnahme konnte durch einfache ARX-Modelle (siehe Gleichung (5.12)) hinreichend gut beschrieben werden. In Abbildung 5.11 ist die, auf der Basis der gefundenen Modelle, errechnete Masseänderung einer gekapselten und einer ungekapselten Spule bei sprunghafter Änderung der Feuchte um 1 % r.F. dargestellt. Hierbei ist die Wirkung der Kapselung sehr gut zu erkennen. Nach einer Zeit von 20 Stunden hat die ungekapselte Spule 8,4 mal soviel Wasser wie die gekapselte Spule aufgenommen.

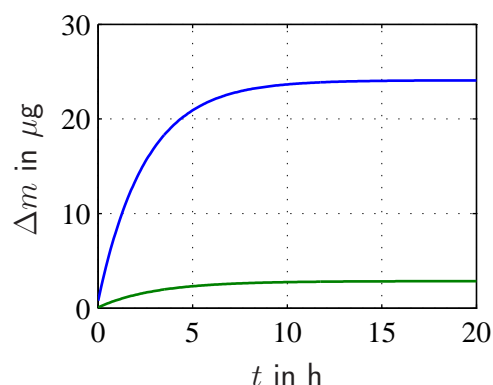


Abbildung 5.11: Feuchtebedingte Masseänderung einer ungekapselten Spule (—) und einer gekapselten Spule (—) bei sprunghafter Änderung der Umgebungsfeuchte um 1 % r.F. (gültig für Feuchtbereich $\varphi = (40 \dots 60) \% \text{ r.F.}$)

5.2.2 Abdichtung

Die Stellen, an denen die Feuchtigkeit in das Bauteil eindringt, werden separat mit geeigneten Mitteln abgedichtet. Hierzu werden von verschiedenen Herstellern (z. B. Epotek) für hermetische Abdichtungen geeignete Klebstoffe angeboten. Eine gute Dichtwirkung kann ebenfalls durch die Verwendung handelsüblicher Schmelzkleber wie z. B. 3M Typ 3748 erzielt werden.

Beispiel: Abdichtung der Präzisionsmeßwiderstände in EMK-Waagen

Im vorigen Abschnitt wurde die prinzipielle Funktionsweise einer EMK-Waage erklärt. Hierbei wurde gezeigt, daß der Spulenstrom ein Maß für die Masse des Wägeguts darstellt. Zur Messung des Spulenstromes durchfließt dieser einen Präzisionsmeßwiderstand. Der resultierende Spannungsabfall wird analog/digital gewandelt und anschließend digital weiterverarbeitet. Demnach hängt die Genauigkeit des Wägeergebnisses direkt von der Konstanz des Meßwiderstandes ab.

In Abbildung 5.12 ist der Präzisionsmeßwiderstand einer Mikrowaage dargestellt. Um die Eigenerwärmung des Meßwiderstandes so gering wie möglich zu halten besitzt dieser eine massive Aluminiumgrundplatte. Zum Schutz vor äußeren Einwirkungen ist das Widerstandsmaterial durch ein Kunststoffgehäuse von der Umgebungsluft abgetrennt.

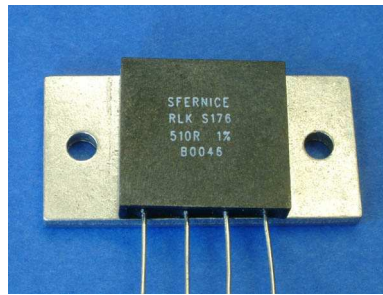


Abbildung 5.12: Präzisionsmeßwiderstand der Firma Sfernice

Durch die experimentelle Untersuchung der Feuchteabhängigkeit derartiger Meßwiderstände konnte eine Einteilung der Meßwiderstände in zwei unterschiedliche Klassen erfolgen. Während ca. 90 % der Meßwiderstände (Klasse normal) eine kaum meßbare Feuchteabhängigkeit aufwiesen, konnte bei ca. 10 % der Meßwiderstände (Klasse undicht) eine deutlich verstärkte Feuchteabhängigkeit nachgewiesen werden. Diese resultiert wahrscheinlich aus einer alterungsbedingten Undichtheit einer Übergangsstelle zwischen Aluminium und Kunststoff. Durch gezielte Abdichtung mit Schmelzkleber konnte die Feuchteabhängigkeit dieser undichten Meßwiderstände deutlich reduziert werden. Dieser Effekt ist in Tabelle 5.2 dargestellt. Aufgrund der relativ großen Unsicherheit bei der Ermittlung der Feuchteabhängigkeit der Meßwiderstände ist der Unterschied zwischen den normalen und den abgedichteten Meßwiderständen nicht signifikant.

	Feuchteabhängigkeit in ppm/% r.F.	
	(40 ... 60) % r.F.	(60 ... 80) % r.F.
normal	+0,08	−1,1
undicht	−13	−60
abgedichtet	−0,12	+0,04

Tabelle 5.2: Lineare statische Feuchteabhängigkeit von Präzisionsmeßwiderständen in unterschiedlichen Feuchtebereichen

5.2.3 Versiegelung

Bei der Versiegelung wird das gesamte Bauteil mit einer feuchteabweisenden Schicht versehen, um Beladungsänderungen zu reduzieren. Zwischen der Versiegelungsschicht und dem Bauteil befindet sich keine Luft. Eine Versiegelung bietet zusätzlichen Schutz vor äußeren mechanischen Einwirkungen, Verschmutzung und Korrosion. Wie im Abschnitt 4.1 gezeigt wurde, hängt die Feuchteaufnahme von Oberflächen auch mit deren Reinigungszustand zusammen. Selbst wenn eine Versiegelung im praktischen Einsatz keine absolute Feuchtedichtheit gewährleistet, so wird durch den Schutz der Oberfläche die zeitliche Stabilität des Feuchteverhaltens erhöht. Im Handel sind verschiedene Versiegelungsmittel erhältlich.

Je nach Anwendungsfall und Material des zu schützenden Bauteils muß hierbei ein passender Versiegelungstoff ausgewählt werden. Häufig werden unterschiedliche Kautschukvarianten eingesetzt. Durch diese wird die Oberfläche sehr gut und langzeitstabil vor äußeren Einwirkungen geschützt. Der Wasserdampfdiffusion stellen sie zumeist nur einen mäßigen Widerstand entgegen.

Beispiel: Versiegelung von Dehnungsmeßstreifen in Präzisionswaagen

Ein typischer Anwendungsfall ist die Versiegelung der Dehnungsmeßstreifen (DMS) in Präzisionswaagen [33].

Bei diesen Waagen bewirkt die Gewichtskraft des Wägeguts die elastische Verformung eines Federkörpers. Diese Verformung wird durch die Dehnung des Verformungskörpers an der Oberfläche mittels Dehnungsmeßstreifen detektiert. Moderne DMS-Waagen haben eine Auflösung von bis zu 150 000 Schritten. Die maximale relative Widerstandsänderung der DMS beträgt ungefähr 1 ‰. Das heißt, wenn der DMS einen Grundwiderstand von $1\text{ k}\Omega$ besitzt, ändert sich dieser bei maximaler Belastung der Waage um $1\text{ }\Omega$. Bei einer Auflösung von 150 000 Schritten entspricht jeder Anzeigeschritt demnach einer Widerstandsänderung von $6,67\text{ }\mu\Omega$ je DMS. Gewöhnlich kommen in der Wägetechnik Foliendehnungsmeßstreifen zum Einsatz, die mittels Klebstoff auf dem Federkörper appliziert werden (siehe Abbildung 5.13).

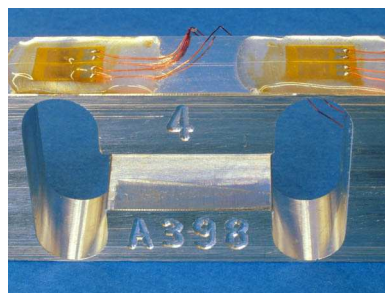


Abbildung 5.13: Ausschnitt des Federkörpers einer Präzisionswaage mit Dehnungsmeßstreifen, auf die eine Versiegelungsschicht aufgebracht wurde

Bei dieser Kombination sind verschiedene Feuchteeffekte denkbar. Nehmen Kleber und Folie Feuchtigkeit auf, so quellen diese um einen gewissen Betrag. Dieses Quellen führt zu einer Widerstandsvergrößerung des DMS, d. h. es handelt sich um einen positiven Feuchteeffekt. Wird durch den feuchten Kleber bzw. die feuchte Folie der Isolationswiderstand geringer, verkleinert sich der Widerstand des DMS. Ebenso können Verunreinigungen auf der Oberfläche des DMS Nebenschlüsse zwischen den einzelnen Leiterbahnen des DMS hervorrufen.

Diese Vermutungen konnten durch praktische Untersuchungen an unversiegelten DMS bestätigt werden. Während sich der Widerstand der DMS bei relativen Feuchten bis ca. 70 % r.F. vergrößerte, wurde bei Feuchten oberhalb von 70 % r.F. ein deutlich negatives Feuchteverhalten beobachtet.

5 Methoden zur Reduzierung der Feuchteabhängigkeit von Präzisionsmeßgeräten

Im Feuchtebereich bis 70 % r.F. wiesen die untersuchten DMS im Mittel eine positive Feuchteabhängigkeit des Widerstandes von 0,15 ppm/% r.F. auf, wobei auch Ausreißer mit einem Feuchtekoeffizienten von mehr als 1 ppm/% r.F. registriert wurden.

Durch eine Versiegelung der DMS mit geeigneten Versiegelungsmitteln konnte die Feuchteabhängigkeit der einzelnen DMS im Klimabereich von $\vartheta = (20 \dots 30)^\circ\text{C}$ und $\varphi = (40 \dots 80) \% \text{ r.F.}$ auf $(0,00 \dots 0,02) \text{ ppm}/\% \text{ r.F.}$ reduziert werden.

Da die DMS der untersuchten Waagentypen als Vollbrücke verschaltet sind, bewirken nicht die feuchtebedingten Widerstandsänderungen eines einzelnen DMS, sondern nur die Unterschiede im Verhalten der DMS eine Feuchteabhängigkeit der Waage. Durch die Versiegelung der DMS wurde neben dem absoluten Betrag der Feuchteabhängigkeit auch die Streuung der Feuchteabhängigkeit der einzelnen DMS deutlich reduziert.

Anhand experimenteller Untersuchungen an Präzisionswaagen konnte gezeigt werden, daß die DMS die Hauptursache der Feuchteabhängigkeit darstellen. Somit konnte die in der Waagenanzeige sichtbare Feuchteabhängigkeit des Nullpunktes durch eine Versiegelung der DMS sehr preisgünstig und nahezu vollständig, wie in Tabelle 5.3 zu erkennen ist, beseitigt werden.

	Feuchteabhängigkeit in mg/% r.F.	
	ohne Feuchteschutz	mit Feuchteschutz
Waage 1	−23,45	−0,72
Waage 2	−5,12	−0,55

Tabelle 5.3: Einfluß der Versiegelung (Feuchteschutz) der DMS auf die lineare statische Feuchteabhängigkeit von zwei Präzisionswaagen gleicher Bauart

5.3 Mathematische Feuchtekompensation

5.3.1 Grundstruktur und Wirkungsweise von mathematischen Feuchtekompensationen

Eine mathematische Feuchtekompensation hat die Aufgabe, die auf ein Meßgerät wirkenden Feuchteinflüsse zu erfassen und ihre Auswirkungen auf das Meßergebnis *rechnerisch* zu beseitigen.

In diesem Abschnitt wird auf die Erstellung und die Eigenschaften von verschiedenen Feuchtekompensationen eingegangen. Alle in dieser Arbeit vorgestellten Kompensationsvarianten berücksichtigen sowohl die Feuchte als auch die Temperatur als Eingangsgröße. Wie im Kapitel 2 gezeigt wurde, sind sowohl die relative Luftfeuchte als auch die Sorption an Feststoffen (Sorptionsgeschwindigkeit und Menge) temperaturabhängig. Da es bei einem feuchteabhängigen Gerät nicht möglich ist, das Temperaturverhalten ohne Berücksichtigung der Luftfeuchte korrekt zu ermitteln und die Feuchteabhängigkeit wiederum temperaturabhängig ist, werden alle folgenden Kompensationsvarianten als zweidimensionales Problem betrachtet. Um diese Wechselwirkung allgemeingültig einzubeziehen, wird der Begriff Feuchtekompensation zu Klimakompensation erweitert, wobei hierbei das Zusammenspiel von Temperatur und Feuchte Berücksichtigung findet.

Von T. Fröhlich wird in [8] das Spezialthema Temperaturkompensation ausführlich abgehandelt.

Abbildung 5.14 zeigt schematisch die Verknüpfung von Meßgerät und Klimakompensation. Die Klimagrößen Feuchte und Temperatur wirken hierbei als Störgröße auf das Meßgerät. Zugleich stellen sie direkt und eventuell in Kombinationen die Eingangsgrößen des Klimamodells dar. Diese Eingangsgrößen werden in der Eingangsmatrix $U = [\varphi - \varphi_0 \quad \vartheta - \vartheta_0 \quad \dots]$ zusammengefaßt. Die klimakompensierte Meßgeräteanzeige y ergibt sich aus der Differenz von der unkompensierten Anzeige des Meßgerätes y^* und dem Modell der Klimaabhängigkeit w wie in Gleichung (5.6) angegeben.

$$y = y^* - w \quad (5.6)$$

Die Ermittlung eines Modells der Klimaabhängigkeit stellt das Hauptproblem der Klimakompensation dar. Dieses Modell kann je nach Kompensationsvariante sehr unterschiedliche Strukturen annehmen. In dieser Arbeit wird ein Überblick über mögliche Kompensationsmodelle gegeben und die Erstellung geeigneter aufgezeigt.

Um die zeitlichen Differenzen zwischen der Erfassung der Klimagrößen (Feuchte und Temperatur) und der Reaktion des Meßgerätes auf diese zu minimieren ist es sinnvoll, die Feuchte und die Temperatur im Gehäuse des Meßgerätes möglichst nah am Meßwandler zu ermitteln. Weiterhin werden durch die örtliche Nähe von Klimamessung und klimasensiblen Bauteilen auch statische Kompensationsfehler minimiert. Die Positionen von Feuchte- und Temperaturfühlern haben somit wesentlichen Einfluß auf die Struktur und Güte der Klimakompensation. Im Unterschied zur Temperaturmessung genügt bei der Feuchtemessung zumeist ein Feuchtesensor im Meßgerät, um die Feuchte korrekt zu erfassen. Das resultiert vor allem aus der Tatsache, daß der Feuchtetransport in das Gehäuse von Meßgeräten immer auf dem

5 Methoden zur Reduzierung der Feuchteabhängigkeit von Präzisionsmeßgeräten

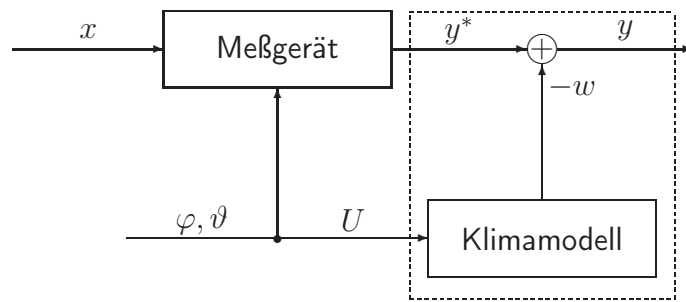


Abbildung 5.14: Prinzip einer mathematischen Klimakompensation

gleichen Weg, im wesentlichen durch die Gehäuseöffnungen, erfolgt. Somit existiert eine definierte räumliche und zeitliche Konzentrationsverteilung im Gehäuse in Abhängigkeit von der Umgebungskonzentration, wenn diese keine Feuchtegradienten in der Nähe des Meßgerätes aufweist. Das Temperaturfeld im Gerät kann hingegen, je nachdem aus welcher Richtung eine Erwärmung des Gerätes erfolgt (z. B. durch Sonneneinstrahlung), sehr unterschiedlich sein. Um es in seiner Komplexität erfassen zu können, sind demnach oft mehrere Temperaturfühler notwendig [8]. Aus der Kenntnis des Temperaturfeldes und der Konzentration im Gehäuse des Meßgerätes kann die Verteilung der relativen Feuchte im Gehäuse ermittelt werden.

Zur Ermittlung der Parameter eines mathematischen Kompensationsmodells müssen experimentelle Untersuchungen im gesamten Gültigkeitsbereich der Kompensation durchgeführt werden. Eine aktive Anregung des Meßgerätes durch gezielte Variation der Klimagrößen ist hierbei unumgänglich.

Aufgrund der unter natürlichen Bedingungen vorhandenen Korrelation zwischen relativer Feuchte und Temperatur ist die Synthese eines korrekten Modells ohne aktive Anregung unmöglich, da die Einzeleinflüsse von Feuchte und Temperatur auf das Meßgerät nicht korrekt ermittelt werden können.

Hinweise zur Durchführung experimenteller Untersuchungen sind den Abschnitten 3.5 und 5.3.4.1 zu entnehmen.

Der Wert x der Meßgröße muß bei den Experimenten bekannt sein (z. B. Meßnormal). Weiterhin muß das Meßgerät in einem bekannten Klimapunkt (Nullpunktversuchsklima mit der Feuchte φ_0 und der Temperatur ϑ_0) korrekt justiert sein (Nullpunkt und Empfindlichkeit der Kennlinie). Dadurch ist sichergestellt, daß das Meßergebnis vor der Klimakompensation in diesem Klimapunkt exakt dem Wert der aufgebrachten Meßgröße entspricht, d. h.

$$y^*(\varphi_0, \vartheta_0) = x. \quad (5.7)$$

Das zu findende Kompensationsmodell wird dann auf den bekannten Klimapunkt bezogen, so daß nur Klimaabweichungen von diesem Punkt korrigiert werden.

Unter diesen Voraussetzungen ergibt sich die Klimaabhängigkeit des Meßgerätes, welche durch das Kompensationsmodell möglichst ideal nachgebildet werden soll, zu

$$w_{ideal} = y^* - x. \quad (5.8)$$

Abbildung 5.15 zeigt beispielhaft die Auswirkungen einer Feuchteänderung auf die statische Kennlinie eines Meßgerätes. Bei der relativen Feuchte φ_0 ist das Meßgerät korrekt justiert. Ändert sich die Feuchte jedoch auf den Wert φ_1 , so werden sowohl der Nullpunkt als auch die Empfindlichkeit der Kennlinie dadurch beeinflusst. Demnach werden im allgemeinen zwei voneinander unabhängige Modelle zur Klimakompensation benötigt. Ein Modell zur Beschreibung des Nullpunktsverhaltens $w_N = \Delta N(\varphi, \vartheta)$ und ein weiteres zur Beschreibung des Verhaltens der Empfindlichkeit $w_E = \Delta E(\varphi, \vartheta)$. In den folgenden Abschnitten wird die Vorgehensweise bei der Erstellung von statischen und dynamischen Kompensationsmodellen behandelt. Diese gilt unabhängig davon, ob ein Modell zur Beschreibung des Nullpunkts- oder des Empfindlichkeitsverhaltens ermittelt werden soll.

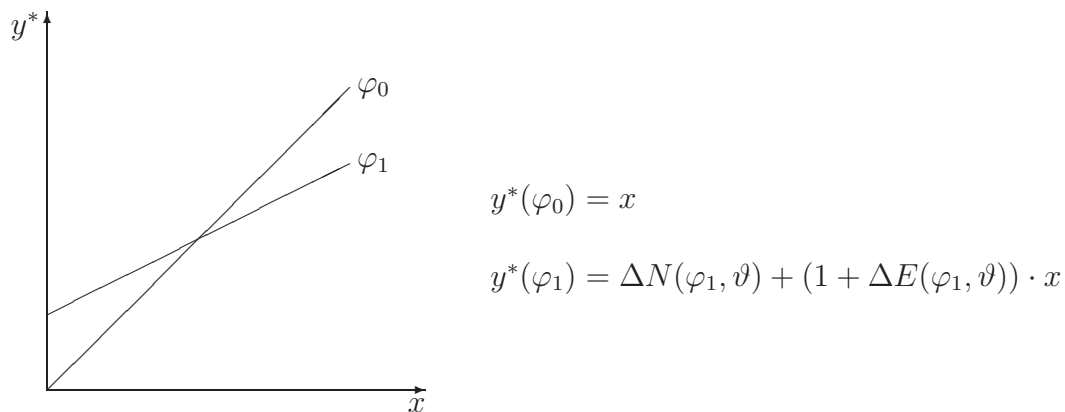


Abbildung 5.15: Mögliche Auswirkung einer Feuchteänderung auf die statische Kennlinie eines Meßgerätes

5.3.2 Betrachtungen zur Berechtigung von mathematischen Feuchtekompensationen

Eine mathematische Feuchtekompensation ist im allgemeinen nur dann sinnvoll, wenn der durch die Kompensation erzielte *Nutzen* in einem günstigen Verhältnis zu den aufzuwendenden *Kosten* steht.

Der Nutzen wird durch die verbleibende Feuchteabhängigkeit des Meßgerätes nach vollzogener mathematischer Feuchtekompensation begrenzt. Keine reale Klimakompensation ist in der Lage, das Feuchteverhalten eines komplexen Gerätes in allen praktischen Fällen ideal nachzubilden. Ursachen hierfür sind beispielsweise

- die begrenzte Zeit zur Identifikation und somit die begrenzte Kenntnis der Klimaabhängigkeit des Meßgerätes,
- das Auftreten von Nichtlinearitäten und Hystereseeffekten beim untersuchten Meßgerät und bei der Feuchtemessung und somit die Begrenzung der mathematischen Kompensation auf einen eingeschränkten Gültigkeitsbereich,
- durch Alterungserscheinungen hervorgerufene zeitliche Variabilitäten des untersuchten Meßgerätes und der Feuchtemessung, die langfristig zu Fehlkompensationen führen können und
- die begrenzte Auflösung der Feuchtemessung, aus der bei hoher Feuchteabhängigkeit des Gerätes ein Kompensationsrauschen entsteht.

Kosten entstehen bei der Realisierung einer mathematischen Feuchtekompensation beispielsweise durch

- die Implementierung von Sensorik, Signalverarbeitung und Auswertung und
- den hohen zeitlichen und somit auch finanziellen Aufwand bei der individuellen Identifikation der Klimaabhängigkeit. Zum Teil können visuell baugleiche Meßgeräte sehr unterschiedlich auf Klimaänderungen reagieren. In diesem Fall sind individuelle Modellstrukturen bzw. gerätespezifische Parameterbestimmungen unumgänglich.

Weiterhin sollte eine mathematische Klimakompensation die Anzeige des Meßgerätes in allen praktisch möglichen Einsatzfällen verbessern. Besonders rekursive Kompensationsmodelle (siehe Abschnitt 5.3.4.2) können direkt nach dem Einschalten des Meßgerätes (Einlaufphase) Kompensationsfehler hervorrufen, da sie den für eine korrekte Funktion notwendigen zurückliegenden Klimaverlauf eventuell nicht kennen.

Liegen deutliche zeitliche Unterschiede zwischen der Reaktion des Gerätes auf eine Feuchteänderung und der Erkennung dieser Änderung durch die Feuchtemessung, so können auch durch statische Kompensationsalgorithmen Fehler entstehen, die bei schnellen Klimaänderungen das Geräteverhalten zum Negativen hin beeinflussen. Dieser Sachverhalt ist in der Abbildung 5.19, auf Seite 80 zu erkennen.

5.3.3 Statische Feuchtekompensation mit Sorptionsmodellen

Wie im Abschnitt 4.1 gezeigt wurde, hängt das statische Feuchteverhalten von der Wasseraufnahme einzelner Bauteile – d. h. von deren Sorptionsisothermen – ab. Mit der Kenntnis der Auswirkungen der klimaabhängigen Beladungen aller feuchtesensiblen Bauteile eines Meßgerätes auf das Meßergebnis läßt sich demzufolge die statische Feuchteabhängigkeit kompensieren. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 5.16 dargestellt und wird durch Gleichung (5.9) beschrieben. X_i gibt hierbei die Beladung des i -ten Bauteils an, und die Funktion f_i beschreibt die Auswirkung der aufgenommenen Wassermenge auf das Meßergebnis.

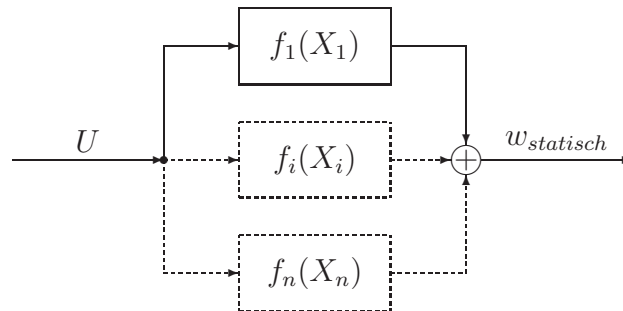


Abbildung 5.16: Zusammensetzung der statischen Feuchteabhängigkeit eines Meßgerätes aus dem Sorptionsverhalten der Einzelbauteile

$$w_{statisch} = \sum_{i=1}^n f_i(X_i(U)) \quad (5.9)$$

Bei komplexen Meßsystemen ist es wegen des enormen Aufwandes nicht praktikabel, die feuchteabhängigen Auswirkungen sämtlicher Einzelbauteile auf das Meßergebnis zu untersuchen und zu beschreiben. Deshalb ist es sinnvoll, nicht die Einzeleinflüsse, sondern die Summe ihrer Auswirkungen auf das Meßergebnis zu betrachten.

Ausgehend von den Annahmen, daß die Summe verschiedener Einzelbeladungen wieder durch eine Sorptionsisothermengleichung mit angepaßten Parametern beschreibbar ist und daß die Beeinflussung des Meßgerätes linear mit der aufgenommenen Wassermenge zusammenhängt, ergibt sich aus Gleichung (5.9) folgende Vereinfachung

$$w_{statisch} = b_0 + b_1 \cdot X_{\Sigma}(U). \quad (5.10)$$

Für die Summe der verschiedenen Einzelbeladungen X_{Σ} wird je nach Struktur der Feuchteabhängigkeit eine der in Abschnitt 2.4 vorgestellten Sorptionsisothermengleichungen verwendet. Die optimalen Modellparameter können mittels geeigneter Minimierungsalgorithmen ermittelt werden.

Bei der Überprüfung von derartigen Kompensationsalgorithmen an verschiedenen Meßgeräten zeigte sich jedoch, daß durch diese im Vergleich zu einfachen Polynomansätzen keine bessere Adaption an das Systemverhalten erreicht werden konnte. Die aufwendige Parameterermittlung und die relativ große Anzahl von Modellparametern sprechen ebenfalls gegen die Realisierung solcher Kompensationsmodelle. Deshalb werden im folgenden von der Physik der Feuchte losgelöste mathematische Kompensationsalgorithmen vorgestellt.

- *Autoregressive Modell (ARX-Modell)*

$$A(q)w(t) = B(q)U(t - nk) + e(t) \quad (5.12)$$

und zum anderen das in Gleichung (5.13) angegebene

- *Output-Error-Modell (OE-Modell).*

$$w(t) = \frac{B(q)}{F(q)}U(t - nk) + e(t) \quad (5.13)$$

Beide Modelle sind von der Struktur her ähnlich, jedoch ist beim OE-Modell der Fehler $e(t)$ wie auch der Systemausgang mit dem Polynom $F(q)$ verknüpft. Da dieser Fehler unbekannt ist, ist die Schätzung der Parameter eines OE-Modells nicht durch ein direktes Verfahren möglich. Im Gegensatz hierzu können die Parameter eines ARX-Modells mittels Regression oder QR-Zerlegung auf direktem Wege ermittelt werden. Somit stellt das ARX-Modell einen guten Ausgangspunkt zur Modellierung der Feuchteabhängigkeit eines Meßgerätes dar.

Je nach Wahl der Eingangsgrößen, der Modellordnung und der Eingangsverzögerungen kann eine immer bessere Annäherung an das reale Systemverhalten erreicht werden. Mit wachsender Modellordnung sinkt im allgemeinen jedoch die Signifikanz der Modellparameter.

5.3.4.1 Kompensation der statischen Feuchteabhängigkeit

Falls zwischen der Feuchte- und Temperaturmessung im Gehäuse des Meßgerätes und der daraus resultierenden Anzeigeänderung keine zeitlichen Differenzen bestehen, so genügt ein statisches Modell zur Kompensation der Klimaabhängigkeit.

Unter Vernachlässigung zurückliegender Ein- und Ausgangsdaten, d. h. $na = 0$, $nb = 1$ und $nk = 0$, resultiert aus dem in Gleichung (5.12) angegebenen ARX-Modell das in Gleichung (5.14) angegebene statische Polynommodell.

$$w(t) = B \cdot U(t) + e(t) \quad (5.14)$$

Zur Ermittlung der Parameter von statischen Modellen finden nur die Ein- und Ausgangsgrößen im ausgeglichenen Zustand Verwendung, d. h. $dU/dt \approx 0$ und $dy^*/dt \approx 0$. Die Struktur der Eingangsmatrix U kann adaptiv an die Komplexität des Systemverhaltens angepaßt werden.

Bei der Wahl der Modellstruktur ist zu gewährleisten, daß die durchgeführten Experimente genügend Informationen zur korrekten Schätzung der Parameter liefern. Für Hinweise zur Gestaltung der Experimente sei auf Abschnitt 3.5 verwiesen. Allgemeine Grundlagen der Versuchsplanung sind entsprechender Spezialliteratur z. B. [32] zu entnehmen.

Da in der Regel die günstigste Modellstruktur a priori nicht bekannt ist, ist es sinnvoll, mit einem Versuchsplan zur Ermittlung einer Modellgleichung erster Ordnung zu beginnen.

Vollständige Versuchspläne haben sich zur Identifizierung von Feuchte- und Temperaturmodellen als geeignet erwiesen, da mit diesen eine eventuell auftretende Wechselwirkung zwischen den Einflußgrößen immer korrekt ermittelt werden kann. Ihr Nachteil liegt in der

5 Methoden zur Reduzierung der Feuchteabhängigkeit von Präzisionsmeßgeräten

exponentiell wachsenden Versuchsanzahl bei steigender Anzahl von Einflußgrößen. Die Versuchsanzahl ergibt sich zu

$$n = 2^l, \quad (5.15)$$

wobei l die Anzahl der Einflußgrößen angibt.

Zur Ermittlung eines Modells erster Ordnung mit zwei Einflußgrößen (Temperatur, Feuchte) sind somit vier Versuche (auch Planungskern genannt) notwendig. Die Aussteuerungen der Einflußgrößen sind in Abbildung 5.17, mit „•“ gekennzeichnet, dargestellt.

Ein vollständiger Modellansatz mit den Einflußgrößen u_1 und u_2 erster Ordnung ergibt sich zu

$$w(t) = b_0 + b_1 \cdot u_1(t) + b_2 \cdot u_2(t) + b_3 \cdot u_1(t) \cdot u_2(t). \quad (5.16)$$

Als vollständig wird dieser Ansatz bezeichnet, da der Mischterm $u_1(t) \cdot u_2(t)$ in der Modellgleichung vorkommt.

Erweist sich ein Modellansatz erster Ordnung als unzureichend, so kann der Versuchsplan um vier sogenannte Sternpunktversuche und einen Nullpunktversuch erweitert werden, um ein Modell zweiter Ordnung zu bestimmen. Die Sternpunktversuche sind in Abbildung 5.17, mit „◊“ gekennzeichnet, dargestellt.

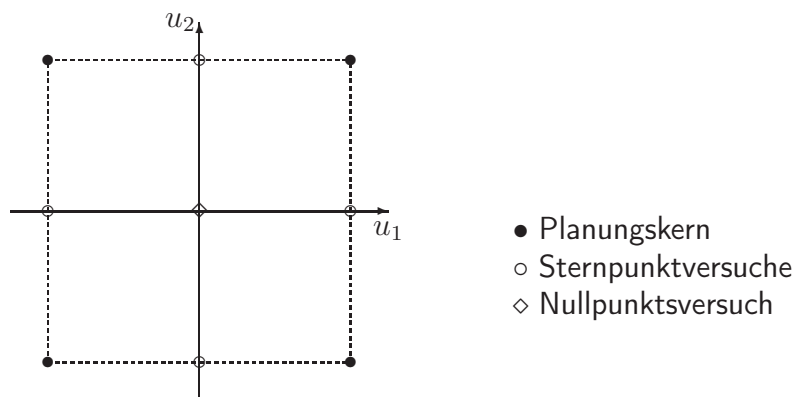


Abbildung 5.17: Zusammengesetzter Versuchsplan mit zwei Einflußgrößen

Bei praktischen Untersuchungen an Meßgeräten ist häufig eine vom Verhalten der Eingangsgrößen unabhängige zeitliche Nullpunktsdrift zu beobachten. Da eine solche Drift die Güte der Modellparameter negativ beeinflussen kann, sollte man sie vor der Parameterschätzung geeignet numerisch eliminieren. Die Driftfunktion kann hierbei aus zusätzlichen Nullpunktversuchen ermittelt werden. Zur Bestimmung der Modellparameter werden diese Nullpunktversuche jedoch nicht verwendet.

Ein möglicher Modellansatz mit den Einflußgrößen u_1 und u_2 zweiter Ordnung ist in Gleichung (5.17) angegeben.

$$w(t) = b_0 + b_1 \cdot u_1(t) + b_2 \cdot u_2(t) + b_3 \cdot u_1(t) \cdot u_2(t) + b_4 \cdot u_1^2(t) + b_5 \cdot u_2^2(t). \quad (5.17)$$

5.3.4.2 Kompensation des statischen und dynamischen Verhaltens

Bestehen Unterschiede im Zeitverhalten zwischen dem im Gehäuse gemessenen Feuchteverlauf und der Reaktion des Meßgerätes auf diesen, so resultieren aus der Anwendung einer statischen Feuchtekompensation zwangsläufig Kompensationsfehler. Diese können durch eine dynamische Feuchtekompensation reduziert werden.

Im Unterschied zu Gleichung (5.16) ist in Gleichung (5.18) eine mögliche Modellstruktur eines dynamischen Modells erster Ordnung (ARX-Modell) angegeben.

$$\begin{aligned} w(t) = & -a_1 \cdot w(t) \cdot q^{-1} + b_0 + \dots \\ & + b_{11} \cdot u_1(t) + b_{12} \cdot u_1(t) \cdot q^{-1} + \dots \\ & + b_{21} \cdot u_2(t) + b_{22} \cdot u_2(t) \cdot q^{-1} + b_3 \cdot u_1(t) \cdot u_2(t) \end{aligned} \quad (5.18)$$

Ein derartiges Modell kann unter Verwendung der *System Identification Toolbox* durch die Befehlszeile:

```
w=arx([w_ideal u_0 u_1 u_2 u_1.*u_2],[1 1 2 2 1 0 0 0 0]);
```

ermittelt werden, wobei sich w_{ideal} aus dem in Gleichung (5.8) angegebenen Zusammenhang ergibt.

In Abbildung 5.18 ist ein Beispiel für die Reaktion eines Meßgerätes auf einen Sprung der relativen Feuchte bei konstanter Temperatur dargestellt. Hierbei ist gut die Tiefpaßwirkung des Gehäuses auf den Sprung der Außenfeuchte zu erkennen. Die Reaktion des Meßgerätes¹ ist jedoch noch deutlich langsamer als der Verlauf der Feuchte im Gehäuse.

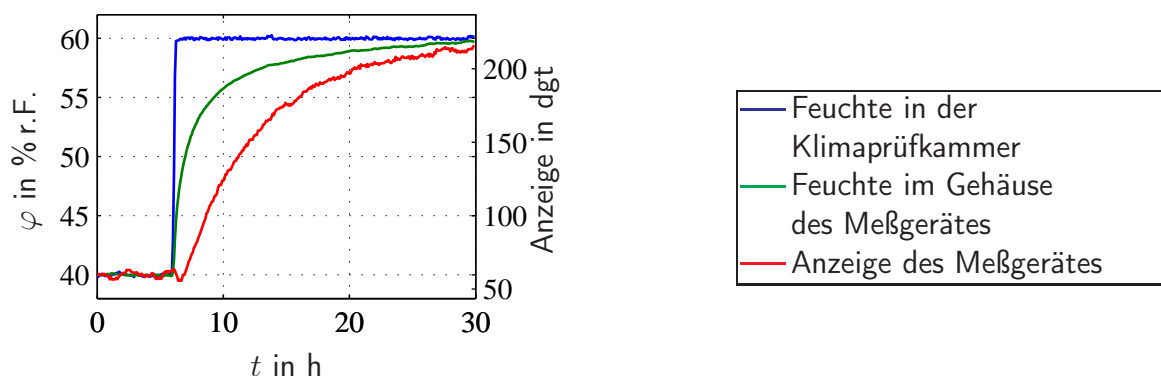


Abbildung 5.18: Zeitlicher Verlauf der Reaktionen der Feuchte im Gehäuse eines Meßgerätes und der Anzeige eines Meßgerätes auf eine sprunghafte Änderung der Umgebungsfeuchte

Aus diesem unterschiedlichen Zeitverhalten resultiert der in Abbildung 5.19 grün dargestellte Verlauf der Anzeige des Meßgerätes nach einer linearen statischen Feuchtekompensation. Die Struktur der entsprechenden Modellgleichung lautet

$$w(t) = b_0 + b_1 \cdot \varphi_{Gehäuse}(t). \quad (5.19)$$

¹1 dgt entspricht dem kleinsten Anzeigeschritt einer Digitalanzeige

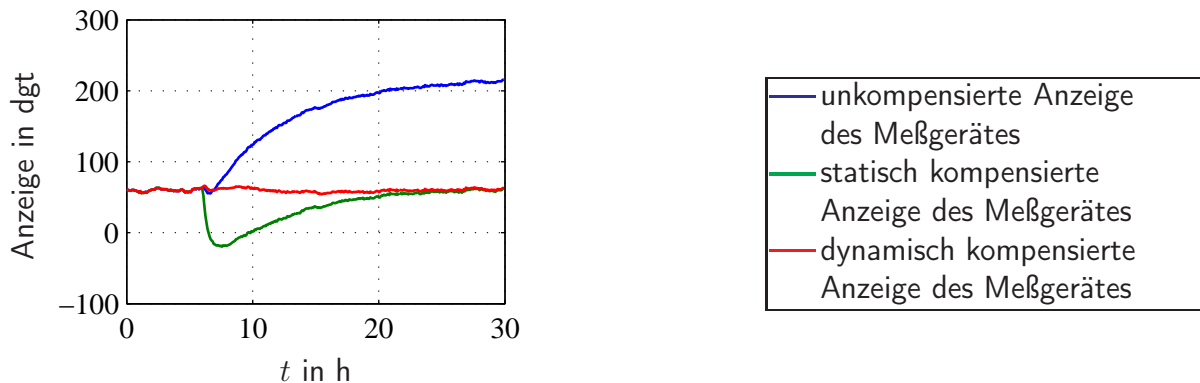


Abbildung 5.19: Unkompenzierte Anzeige des Meßgerätes im Vergleich zur statisch feuchte-kompensierten Anzeige und zur dynamisch feuchtekompenzierten Anzeige

Durch ein einfaches ARX-Modell der Form

$$w(t) = -a_1 \cdot w(t) \cdot q^{-1} + b_0 + b_1 \cdot \varphi_{\text{Gehäuse}}(t) + b_2 \cdot \varphi_{\text{Gehäuse}}(t) \cdot q^{-1} \quad (5.20)$$

läßt sich das statische und das dynamische Verhalten gemeinsam beschreiben. Die nach der Kompensation mit diesem dynamischen Modell verbleibende Anzeige des Meßgerätes ist zum Vergleich ebenfalls in Abbildung 5.19 dargestellt. Hierbei ist zu erkennen, daß die dynamisch feuchtekompenzierte Anzeige nahezu keine Feuchteabhängigkeit aufweist.

5.3.5 Statische Kompensation mittels stückweiser Interpolation

Läßt sich das statische Feuchteverhalten nicht hinreichend gut durch ein Polynommodell niedriger Ordnung beschreiben, so ist es zumeist nicht sinnvoll, die Modellordnung weiter zu erhöhen. Prinzipiell kann man zwar zu jeder Messung ein Polynom höherer Ordnung finden, welches das statische Verhalten in den Versuchspunkten exakt beschreibt, jedoch wird dieses Modell außerhalb des Versuchsbereiches und auch zwischen den Versuchspunkten nicht das wahre Systemverhalten widerspiegeln. Für ein Gerät mit solch einem Verhalten ist eine Modellierung mittels stückweiser Interpolation besser geeignet. Die Kompensation beruht hierbei auf dem Prinzip, daß die Geräteanzeige um genau das in dem jeweiligen Klimapunkt ermittelte statische Fehlverhalten korrigiert wird. Zwischen den Stützstellen wird z. B. linear oder kubisch interpoliert. Dazu ist es notwendig, das Geräteverhalten in möglichst vielen Klimapunkten durch experimentelle Untersuchungen zu ermitteln. Hierzu wird der Versuchsbereich in ein, je nach Komplexität des Geräteverhaltens, mehr oder weniger feines und orthogonales Gitter unterteilt. Die Forderung nach Orthogonalität ist wichtig, da sonst eine Interpolation nach den hier vorgestellten Methoden nicht möglich ist. Falls im Versuch keine exakt orthogonale Gitterteilung realisiert wurde, kann diese durch eine entsprechende mathematische Transformation in gewissen Grenzen nachträglich erzeugt werden.

Um die klimabedingten Abweichungen des Gerätes korrekt ermitteln zu können, muß das Gerät in einem beliebigen Versuchspunkt justiert sein. Die Meßabweichungen ergeben sich dann als Differenz aus Geräteanzeige und der Anzeige im justierten Klimapunkt. Aus diesen Meßabweichungen wird die Kompensationsmatrix W erstellt. Die Verteilung der Versuchspunkte,

die von der Struktur dem Aufbau der Kompensationsmatrix entspricht, ist in Abbildung 5.20 dargestellt.

Bei der Ermittlung der Kompensationsmatrix ist zu beachten, daß Fehler der Klimamessung und Störungen auf der Geräteanzeige unvermindert in die Kompensation eingehen. Um einen statistisch gesicherten Kompensationswert zu erhalten, sollten die experimentellen Untersuchungen mit größter Sorgfalt und mehrere Versuche je Versuchspunkt durchgeführt werden.

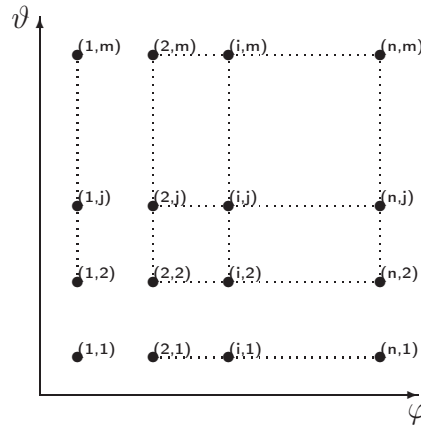


Abbildung 5.20: Unterteilung des Versuchsbereiches in $m \cdot n$ Versuchspunkte

Bei der Anwendung der Klimakompensation wird mit den gemessenen Klimaistwerten der Kompensationswert $w(\varphi, \vartheta)$ aus der Kompensationsmatrix durch Interpolation ermittelt und von der Geräteanzeige subtrahiert.

Allgemeingültig und einfach auf komplexere Probleme (höhere Dimensionen) erweiterbar, läßt sich eine stückweise Interpolation durch sogenannte *B-Splines* beschreiben. Hierbei wird das Interpolationsproblem auf ein mathematisches Filterproblem zurückgeführt. Zur Beleuchtung des mathematischen Hintergrundes sowie zu detaillierten Grundlagen dieser Betrachtungen sei auf weiterführende Literatur [25, 23, 24] verwiesen. An dieser Stelle soll lediglich eine kurze Zusammenfassung dieser bekannten Algorithmen erfolgen.

In Gleichung (5.22) ist die allgemeine Beziehung zur Filterung der Funktion f mit der Filterfunktion B dargestellt. Hierbei wurde der Wertebereich auf das Intervall $\varphi_n \in [0,1]$ normiert, was ohne Verletzung der Allgemeingültigkeit zulässig ist. Um die Filterfunktion B auf dieses Intervall anzupassen, wird die Transformation

$$B^{k,n}(\varphi_n) = B(n\varphi_n - k) \quad (5.21)$$

eingeführt. Die in Gleichung (5.22) verwendete Schreibweise $B^{k,n}(\varphi_n)$ ist die bezüglich B um k/n verschobene und n -fach gestauchte Filterfunktion.

$$w(\varphi_n) = \sum_{k=0}^n f\left(\frac{k}{n}\right) B^{k,n}(\varphi_n) \quad (5.22)$$

Die Funktion

$$B_1(\varphi_n) = \begin{cases} 0 & , \text{ falls } \varphi_n \leq -1 \\ 1 + \varphi_n & , \text{ falls } -1 < \varphi_n \leq 0 \\ 1 - \varphi_n & , \text{ falls } 0 < \varphi_n \leq 1 \\ 0 & , \text{ falls } \varphi_n > 1 \end{cases} \quad (5.23)$$

wird als linearer B-Spline bezeichnet, da durch Filterung mit dieser Funktion eine geradlinige Verbindung zwischen den Stützstellen von f erzielt wird. Abbildung 5.21 zeigt den Verlauf dieser Funktion graphisch.

Somit ergibt sich der Kompensationswert im Falle der eindimensionalen stückweisen linearen Interpolation zu

$$w_{B_1}(\varphi_n) = \sum_{k=0}^n W\left(\frac{k}{n}\right) B_1^{k,n}(\varphi_n). \quad (5.24)$$

Durch sogenannte *Tensorierung* wird der Übergang zum bilinearen Problem geschaffen. Dies geschieht durch Produktbildung der Grundfunktion B_1 , bzw. $B_1^{k,n}$, wie in Gleichung (5.25) angegeben. In Abbildung 5.21 ist dieser bilineare bzw. tensorierte B-Spline TB_1 graphisch dargestellt.

$$TB_1^{[k,n][l,m]}(\varphi_n, \vartheta_n) = B_1^{k,n}(\varphi_n) B_1^{l,m}(\vartheta_n) \quad (5.25)$$

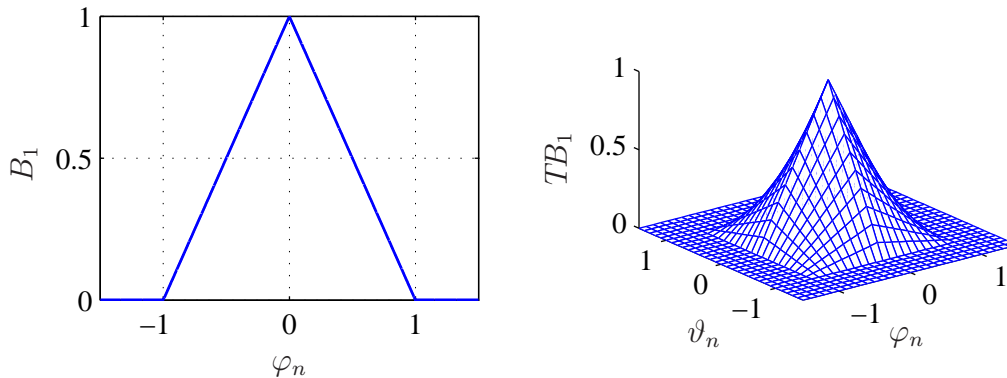


Abbildung 5.21: Linearer B-Spline B_1 (links) und tensorierter linearer B-Spline TB_1 (rechts)

Der mittels bilinearen B-Spline interpolierte Kompensationswert $w(\varphi, \vartheta)$ ergibt sich somit in Anlehnung an Gleichung (5.24) zu

$$w_{TB_1}(\varphi_n, \vartheta_n) = \sum_{k=0}^n \sum_{l=0}^m W\left(\frac{k}{n}, \frac{l}{m}\right) TB_1^{[k,n][l,m]}(\varphi_n, \vartheta_n). \quad (5.26)$$

Falls durch die bilineare Interpolation nicht die geforderte Kompensationsgüte zwischen den Interpolationsstützstellen erzielt wird, ist der Übergang zur kubischen Splineinterpolation möglich. In Abbildung 5.22 sind der kubische B-Spline und der tensorierte kubische B-Spline dargestellt. Aufgrund der zweimal stetigen Differenzierbarkeit entsteht durch Filterung mit dem kubischen B-Spline ein glatter Kurvenverlauf.

Da die mit der kubischen Splineinterpolation verbundene Mathematik relativ umfangreich ist, soll an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen und auf entsprechende Spezialliteratur verwiesen werden. Als Problempunkte seien das Randverhalten und das Interpolationsverhalten des kubischen B-Splines genannt. Im Gegensatz zum linearen B-Spline interpoliert der kubische B-Spline die Kompensationsmatrix W nicht zwangsläufig.

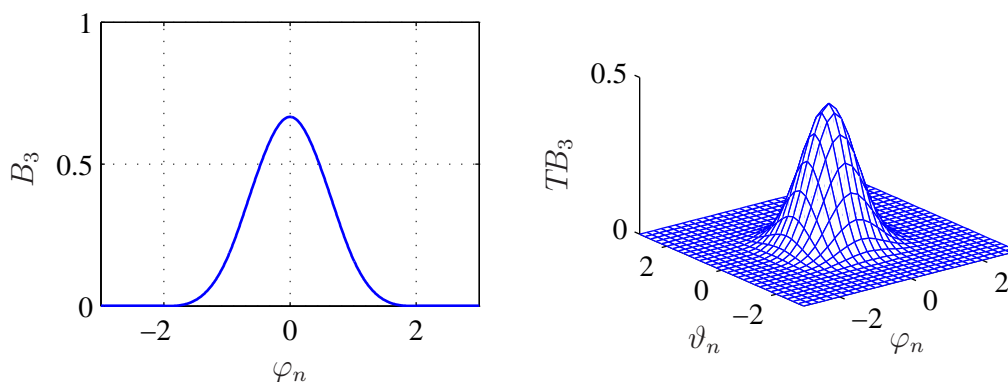


Abbildung 5.22: Kubischer B-Spline B_3 (links) und tensorierter kubischer B-Spline TB_3 (rechts)

Zusammenfassend ist festzuhalten, daß die statische Kompensation mittels stückweiser Interpolation eine sehr genaue Variante der Klimakompensation darstellt, die auch für Geräte mit stark nichtlinearem Verhalten anwendbar ist. Der zeitliche Aufwand zur Ermittlung der Kompensationsmatrix und die Anforderungen an die Speicher- und Rechenkapazität des Meßgerätes sind hoch, wobei die Kosten für Speicher- und Rechenkapazität in Zukunft weiterhin sinken werden. Ob der Mehraufwand für eine bikubische Splineinterpolation gegenüber der bilinearen Splineinterpolation gerechtfertigt ist, muß im Einzelfall geprüft werden.

5.3.6 Einfluß der Feuchtedarstellung auf die Güte einer Feuchtekompensation und auf das Temperaturverhalten

In den bisherigen Betrachtungen zur mathematischen Kompensation des Feuchteverhaltens von Meßgeräten wurden verschiedene Modellstrukturen vorgestellt und der Weg der Parameterbestimmung behandelt. An dieser Stelle soll die Frage nach der *richtigen Wahl der Feuchtedarstellung* als Modelleingangsgröße diskutiert werden. Hinter dem Begriff *Feuchtedarstellung* verbirgt sich hierbei die Variante der Beschreibung der Feuchte, d. h. ob sie als relative Feuchte, absolute Feuchte, Dampfdruck, Taupunkttemperatur oder ähnlichen Berücksichtigung findet.

Prinzipiell ist es möglich, Kompensationsmodelle mit jeglicher Form der Feuchtedarstellung zu verwenden, da ein eindeutiger mathematischer Zusammenhang zwischen den verschiedenen Darstellungsvarianten existiert. Das Problem besteht nun aber darin, daß dieser Zusammenhang mit einer nichtlinearen Temperaturabhängigkeit verbunden ist. Somit hängen die Komplexität und Güte einer Feuchtekompensation auch von der verwendeten Feuchtedarstellung ab.

5 Methoden zur Reduzierung der Feuchteabhängigkeit von Präzisionsmeßgeräten

Wie im Abschnitt 4.1 gezeigt wurde, beruht die Feuchteabhängigkeit auf der Wasseraufnahme bestimmter Bauteile und der Luft. Das aufgenommene Wasser kann das Meßgerät über verschiedene Wirkungen beeinflussen. Der statische Zusammenhang dieses Effektes ist in Gleichung (5.9) angegeben. Da die Auswirkungen der Wasseraufnahme recht vielfältig sein können, kann die Frage nach der richtigen Feuchtedarstellung nur über die Beladung geklärt werden. Die Wasserbeladung eines Stoffes, d. h. seine Sorptionsisotherme, wird in der Regel als Funktion von der relativen Feuchte angegeben (siehe Abschnitt 2.4). Die Ursache hierfür liegt unter anderem in der Temperaturabhängigkeit der Sorptionsisothermen begründet, welche durch Gleichung (2.22) beschrieben wird. Bei bekannten Sorptionsisothermenparametern ist es somit möglich, temperaturabhängige Feststoffbeladungen mit unterschiedlicher Feuchtedarstellung zu vergleichen. Dabei ist festzustellen, daß die temperaturabhängige Beladungsänderung bei konstanter relativer Feuchte deutlich kleiner ist als bei anderen Darstellungsvarianten.

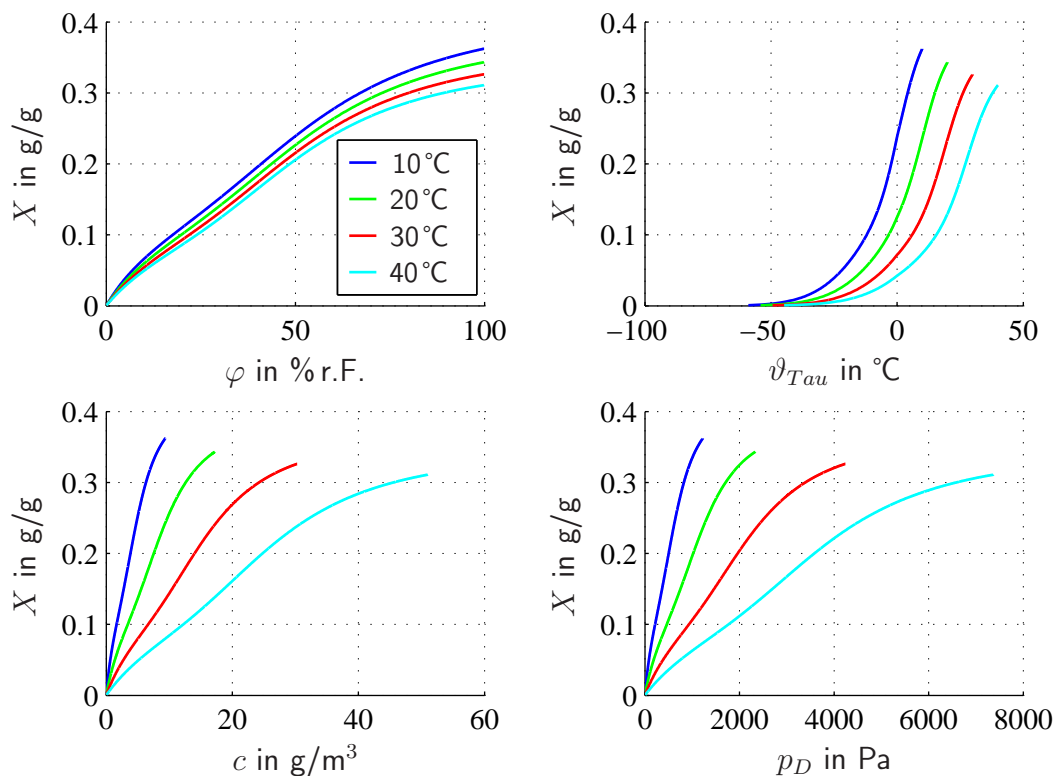


Abbildung 5.23: Sorptionsisothermen von Silikagel bei verschiedenen Temperaturen in Abhängigkeit von der Feuchtedarstellung

In Abbildung 5.23 ist dieser Sachverhalt am Beispiel von Silikagel gezeigt. Die Auswahl des Stoffes Silikagel für diese Betrachtungen liegt ausschließlich in der genauen Kenntnis des temperaturabhängigen Sorptionsverhaltens von Silikagel begründet. Die Verwendung anderer Stoffe würde vergleichbare Ergebnisse liefern.

Die dargestellten Kurven wurden nach der BDDT-Sorptionsisothermengleichung mit den von Busweiler angegebenen Parametern berechnet [5]. Weiterhin fand die von Busweiler er-

mittelte zusätzliche Bedingung der Temperaturabhängigkeit nach Gleichung (2.23) bei der Berechnung Berücksichtigung. Den Ausgangspunkt bildet die Abbildung des Beladungsverhaltens über der relativen Feuchte. Die anderen Abbildungen entstanden durch Umrechnung der relativen Feuchte unter Berücksichtigung der Temperatur in die jeweilige Darstellungsform. Somit wird in allen Diagrammen der gleiche Klimabereich abgedeckt.

Im folgenden wird gezeigt, wie gut verschiedene Modellansätze erster Ordnung in Abhängigkeit von der gewählten Feuchtedarstellung das in Abbildung 5.23 gezeigte statische Feuchteverhalten widerspiegeln. Als Modellgleichung fanden hierbei

$$X_{Modell}(Feuchte, \vartheta) = FK \cdot Feuchte + TK \cdot \vartheta + X_0 \text{ und} \quad (5.27)$$

$$X_{Modell}(Feuchte, \vartheta) = FK \cdot Feuchte + TK \cdot \vartheta \cdot Feuchte + X_0 \quad (5.28)$$

Verwendung. Während die Struktur von Gleichung (5.27) im Feuchte-Beladungs-Diagramm eine Schar paralleler Isothermen definiert, erzeugt Gleichung (5.28) Isothermen mit einem gemeinsamen Schnittpunkt. Die Modellparameter TK , FK und X_0 wurden mittels Regression geschätzt. Abbildung 5.24 zeigt den aus der unterschiedlichen Feuchtedarstellung resultierenden Modellfehler bei verschiedenen Temperaturen. Hierbei ist zu erkennen, daß die beiden Modelle mit relativer Feuchte als Eingangsgröße bei allen Temperaturen die beste Approximation des Verlaufes der Sorptionsisothermen erzielen. Beschränkt man die Modellierung auf kleinere Feuchtebereiche, so bleibt diese Relation erhalten.

Ob Gleichung (5.27) oder Gleichung (5.28) eine bessere Approximation des Sorptionsverhaltens darstellt, wird durch die Größe des abzudeckenden Feuchtebereiches entschieden. Für kleine Bereiche liefert Gleichung (5.27) die besseren Ergebnisse, für große Bereiche hingegen ist Gleichung (5.28) zu bevorzugen.

Weiterhin besteht zwischen den Modellen mit unterschiedlicher Feuchtedarstellung ein erheblicher Unterschied in der Größe der ermittelten Temperaturabhängigkeit, wie in Tabelle 5.4 zu erkennen ist. Diese ist bei Verwendung der relativen Feuchte als Eingangsgröße deutlich geringer als bei jeder anderen Feuchtedarstellung.

Hieraus resultieren wichtige Konsequenzen bei der Ermittlung des wirklichen (feuchteunabhängigen) Temperaturverhaltens eines Meßgerätes. In der Praxis wird die Temperaturabhängigkeit eines Meßgerätes in der Regel durch Temperaturversuche in einem abgeschlossenen Raum ermittelt. Somit wird das Temperaturverhalten bei näherungsweise konstanter absoluter Feuchte bestimmt. Weist das untersuchte Meßgerät eine Feuchteabhängigkeit auf, so resultiert aus der Temperaturänderung bei konstanter absoluter Feuchte eine Beladungsänderung der feuchtesensiblen Bauteile und somit eine Änderung der Geräteanzeige. Diese temperaturbedingte Feuchteabhängigkeit wird in das Temperaturverhalten des Meßgerätes transformiert. Da in der meßtechnischen Praxis kaum ein Meßgerät unter konstanter absoluter Feuchte betrieben wird, stimmt das so ermittelte Temperaturmodell nicht mit dem praxisrelevanten Temperaturverhalten des Meßgerätes überein.

Hätte man das Temperaturverhalten unter konstanter relativer Feuchte ermittelt, so käme man dem wahren Temperaturverhalten des Gerätes näher.

5 Methoden zur Reduzierung der Feuchteabhängigkeit von Präzisionsmeßgeräten

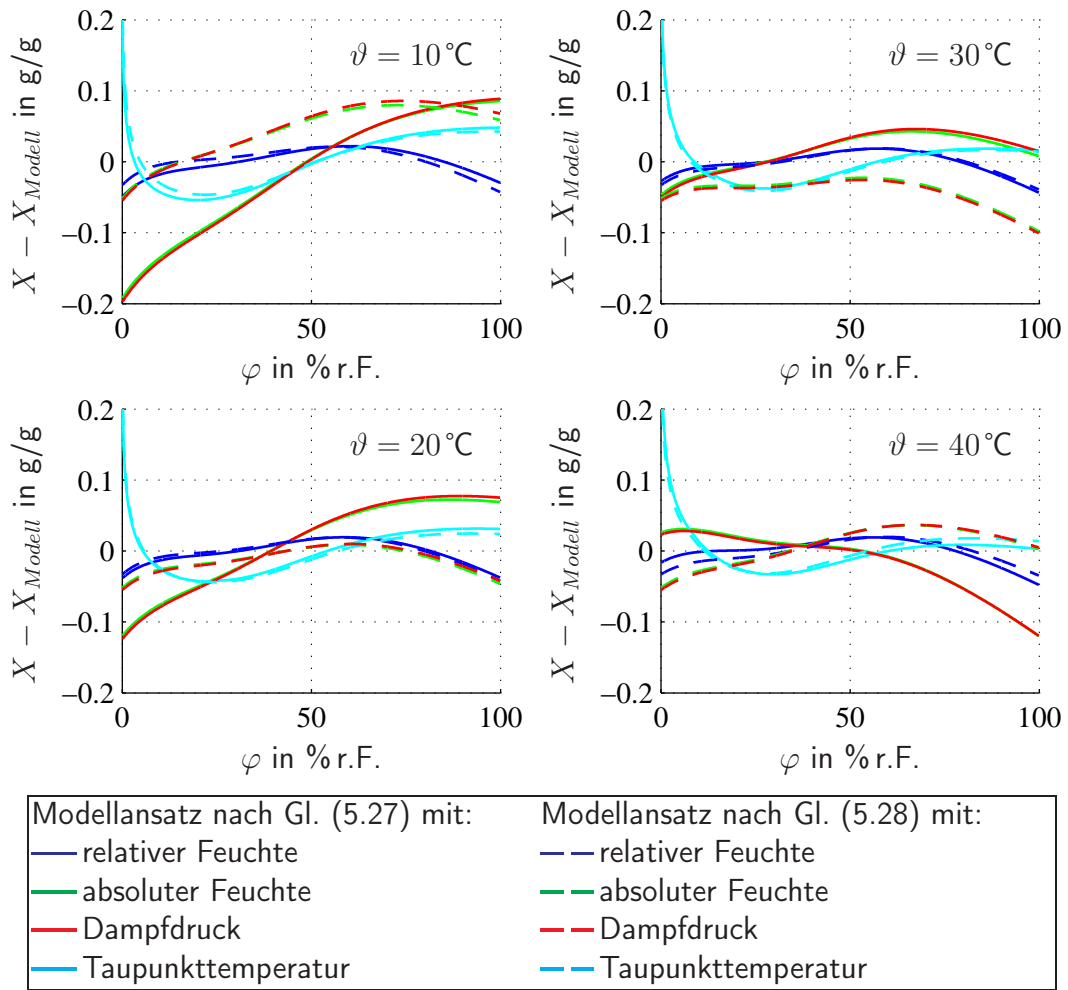


Abbildung 5.24: Abweichung der ermittelten Modelle von der Silikagel-Sorptionsisotherme bei unterschiedlichen Temperaturen

Feuchtedarstellung	TK in K^{-1}
relative Feuchte	$-1,1 \cdot 10^{-3}$
absolute Feuchte	$-7,3 \cdot 10^{-3}$
Dampfdruck	$-7,4 \cdot 10^{-3}$
Taupunkttemperatur	$-7,5 \cdot 10^{-3}$

Tabelle 5.4: Aus unterschiedlicher Feuchtedarstellung resultierende Temperaturkoeffizienten bei Modellansatz nach Gleichung (5.27)

Eine wichtige Erkenntnis aus diesen Betrachtungen ist, daß bei feuchteabhängigen Geräten eine Temperaturabhängigkeit existiert, die dem Feuchteverhalten zuzuordnen ist. Zu

Kompensationszwecken muß man also Temperatur- und Feuchteverhalten stets sauber voneinander trennen.

Bei dem hier angeführten Beispiel stellte sich heraus, daß durch die Modellierung des Feuchteverhaltens unter Verwendung der Feuchtedarstellung als relative Feuchte die beste Übereinstimmung zwischen Modell und vorgegebenen Sorptionsverhalten erzielt wird. Die feuchtebedingte Temperaturabhängigkeit wird hierbei ebenfalls minimiert.

Diese Ergebnisse konnten durch alle durchgeführten experimentellen Untersuchungen an realen Meßgeräten bestätigt werden.

5.3.7 Minimierung des Feuchteinflusses durch geeignete Wahl der Feuchtedarstellung

Je nachdem wie groß die Feuchteabhängigkeit eines Meßgerätes ist, muß entschieden werden, ob der Einsatz einer mathematischen Feuchtekompensation lohnenswert ist. Besonders bei Grenzfällen (unter diesem Gesichtspunkt) kann durch Berücksichtigung einer konstanten mittleren Feuchte die Feuchteabhängigkeit des Meßgerätes mittels einer mathematischen Kompensation reduziert werden, obwohl keine Feuchtemeßstelle in das Gerät implementiert wurde.

Einfluß auf die Güte hat hierbei nicht nur der Zahlenwert, sondern auch die Darstellungsvariante der verwendeten Feuchte. In der Kompensationsgleichung taucht die Feuchte somit als ein konstanter Offset auf. Da die verschiedenen Feuchtedarstellungen über eine temperaturabhängige Funktion miteinander verknüpft sind, ist es relevant, in welcher Darstellungsvariante die Feuchte als konstant angenommen wird.

Dieser Aspekt ist beispielsweise in der Laserinterferometrie von Bedeutung. Die Abhängigkeit der Brechzahl der Luft von der Luftfeuchte ist in den Gleichungen (4.2) und (4.3) angegeben. Auch wenn verschiedene kommerziell erhältliche Interferometer keine Feuchtemeßstelle enthalten, kann der Einfluß der Luftfeuchte auf die Brechzahl in gewissen Grenzen reduziert werden.

Im folgenden Beispiel wird der Einfluß der Feuchtedarstellung auf eine mathematische Kompensation von Luftdichte und Luftbrechzahl bei unbekannter Luftfeuchte gezeigt.

Beispiel:

Herrscht im Meßraum ein mittleres Klima von $\vartheta = 20^\circ\text{C}$, $\varphi = 50\% \text{ r.F.}$, was einem Dampfdruck von $p_D = 11,7 \text{ hPa}$ entspricht (der Luftdruck wird für diese Betrachtungen als konstant angenommen), so ist es sinnvoll, die feuchterelevanten Terme der Gleichungen (4.1) und (4.2) mit dieser mittleren Feuchte zu belegen und nicht zu Null zu setzen. Durch diesen Ansatz wird trotz fehlender Feuchtemessung im Mittel kein Kompensationsfehler begangen. Die Streuung des Fehlers um den Mittelwert kann durch die Darstellungsvariante der Feuchte weiter reduziert werden.

In Abbildung 5.25 sind die verbleibenden relativen Fehler einer mathematischen Temperaturkompensation von Luftdichte und Luftbrechzahl unter der Annahme einer konstanten relativen Feuchte und einer konstanten absoluten Feuchte dargestellt. Unter praktisch möglichen Raumklimaschwankungen von $\vartheta = (15 \dots 25)^\circ\text{C}$ und $\varphi = (40 \dots 60)\% \text{ r.F.}$ ist die

5 Methoden zur Reduzierung der Feuchteabhängigkeit von Präzisionsmeßgeräten

Annahme der konstanten relativen Feuchte die zu bevorzugende Entscheidung, da der entstehende Fehler hierbei deutlich geringer als der bei Annahme einer konstanten absoluten Feuchte ist.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist in Abbildung 5.25 der aus der Annahme eines konstanten Dampfdrucks resultierende Kompensationsfehler nicht eingezeichnet. Zur Vollständigkeit sei jedoch erwähnt, daß dieser noch geringfügig größer als der Fehler bei Festsetzung der absoluten Feuchte ist.

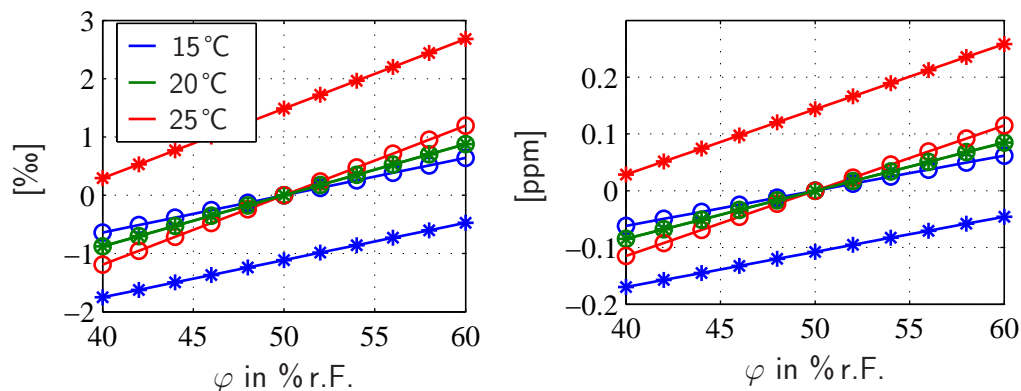


Abbildung 5.25: Feuchteabhängiger relativer Fehler von mathematischer Luftdichtekompensation (links) und Luftbrechzahlkompensation (rechts) unter Berücksichtigung konstanter relativer Feuchte von 50 % r.F. – mit „o“ gekennzeichnet – und unter Berücksichtigung konstanter absoluter Feuchte von $8,64 \text{ g/m}^3$ ($\cong 50 \text{ \% r.F., } 20^\circ\text{C}$) – mit „*“ gekennzeichnet

5.3.8 Mathematische Kompensation der Feuchteabhängigkeit am Beispiel einer Präzisionswaage

Das in diesem Abschnitt angeführte Beispiel umfaßt die Ermittlung der Klimaabhängigkeit einer Präzisionswaage und die Erstellung sowohl einer statischen als auch einer dynamischen mathematischen Klimakompensation [12].

Abbildung 5.26 zeigt die untersuchte Waage der Firma Sartorius vom Typ LC 6200 S.

Diese Waage arbeitet nach dem Prinzip der elektromagnetischen Kraftkompensation [33]. Um den elektrischen Strom durch die Kompensationsspule der Waage möglichst gering zu halten, besitzt diese Waage einen sogenannten zweiseitigen Regelkreis. Befindet sich die Hälfte der maximal möglichen Masse auf der Waagschale, ist die Waage im mechanischen Gleichgewicht, d. h. es fließt kein Strom durch die Spule. Dieser Zustand wird deshalb auch elektrischer Nullpunkt der Waage genannt.

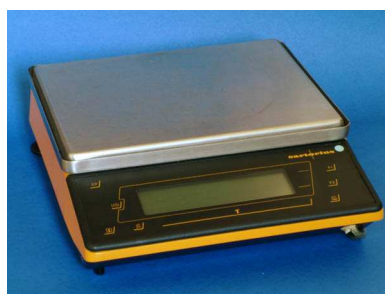


Abbildung 5.26: Präzisionswaage LC 6200 S

Wägebereich	(0...6200) g
Ablesbarkeit	0,01 g
Tarierbereich (subtraktiv)	−6200 g
Reproduzierbarkeit	$\leq \pm 0,01$ g
Linearitätsabweichung	$\leq \pm 0,02$ g
Umgebungstemperaturbereich	(0...40) °C
Feuchtekategorie nach DIN 40040	F, nicht kondensierend

Tabelle 5.5: Technische Daten der Waage LC 6200 S

In Tabelle 5.5 sind die technischen Daten der Waage laut Hersteller zusammengefaßt. Serienmäßig verfügt die Waage über eine statische Temperaturkompensation von Nullpunkt und Empfindlichkeit. Demzufolge ist das bei dieser Untersuchung ermittelte Temperaturverhalten der Waage lediglich ein Offset zum bereits kompensierten statischen Temperaturverhalten.

Zur Bestimmung der Temperatur- und Luftfeuchtwerte im Inneren der Waage wurde ein kombinierter Feuchte- und Temperaturfühler vom Typ Hy-Cal IH 3602 C (siehe Abschnitt 3.2) in das Waagengehäuse nahe am Wägesystem eingebaut. Bei der durchgeführten Untersuchung befand sich die Waage in einer Klimaprüfkammer auf einem entkoppelten Wägestein, wie schematisch in Abbildung 3.1 dargestellt ist. Als Klimaverlauf wurde ein orthogonaler Versuchsplan, auf der Basis der in Abschnitt 3.5 genannten Hinweise, realisiert. Jedes Klima wurde über einen Zeitraum von einem Tag konstant gehalten. Dadurch war sichergestellt, daß die Waage in jedem Klimapunkt annähernd einen statischen Endwert erreichen konnte. Der Klimaverlauf im Inneren der Waage ist in Abbildung 5.27 dargestellt.

Da das Verhalten der Empfindlichkeit der Waage keine Feuchteabhängigkeit im Rahmen der Auflösung aufweist, wird im folgenden lediglich das Verhalten der Waage im elektrischen Nullpunkt untersucht. Abbildung 5.28 zeigt die Reaktion der Waage im elektrischen Nullpunkt auf den Klimaverlauf.

5 Methoden zur Reduzierung der Feuchteabhängigkeit von Präzisionsmeßgeräten

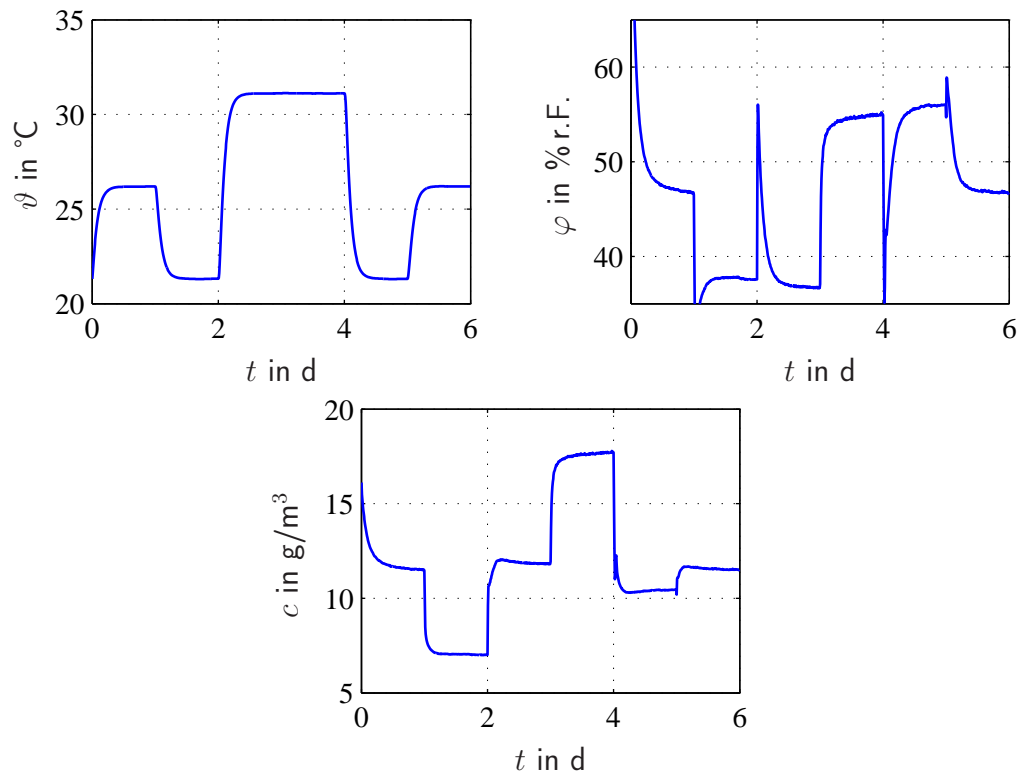


Abbildung 5.27: Zeitlicher Verlauf von Temperatur, relativer Luftfeuchte und absoluter Luftfeuchte im Gehäuse der LC 6200 S

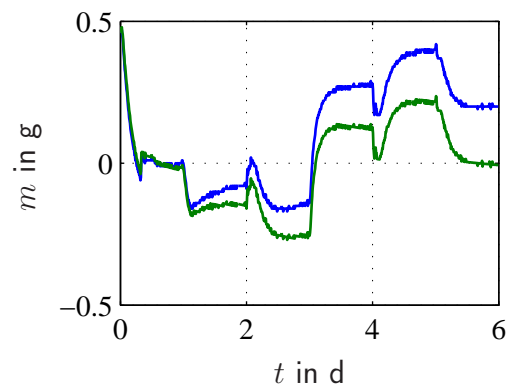


Abbildung 5.28: Zeitlicher Verlauf der Waagenanzeige der LC 6200 S (—) und der mathematisch driftbefreiten Waagenanzeige (—)

Zu Beginn und am Ende der Messung wurde der gleiche Klimapunkt ($\vartheta = 25^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 50\% \text{ r.F.}$) eingestellt. Demzufolge sollte die Waage zu den Zeitpunkten $t = 1 \text{ d}$ und $t = 6 \text{ d}$ auch den gleichen Wert anzeigen. Da dies nicht der Fall ist, muß vor einer mathematischen Kompensation die zeitliche Drift von der Anzeige eliminiert, bzw. in der mathematischen Kompensation berücksichtigt werden. Zur Ermittlung mathematischer Kompensationsmodelle fand die in Abbildung 5.28 dargestellte, mathematisch driftbefreite Waagenanzeige als

Zielgröße (w_{ideal}) Verwendung.

5.3.8.1 Statische Kompensation der Feuchte- und Temperaturabhängigkeit der Waage

Basierend auf den in Abschnitt 5.3.4.1, Seite 77 angegebenen Zusammenhängen wurde ein statisches Polynommodell zur Klimakompensation ermittelt. Als Modelleingangsgröße kam die relative Feuchte als Feuchtedarstellung zum Einsatz, da Modelle mit absoluter Feuchte bei gleicher Modellordnung deutlich schlechtere Kompensationsergebnisse lieferten. Zur Schätzung der Modellparameter fanden nur die Klima- und Wägewerte im ausgeglichenen Zustand, wie in Abbildung 5.29 beispielhaft für die Wägewerte dargestellt, Verwendung.

Durch einen linearen Modellansatz konnte das statische Feuchte- und Temperaturverhalten der Waage hinreichend gut beschrieben werden. In Gleichung 5.29 ist das Kompensationsmodell mit den ermittelten Modellparametern angegeben.

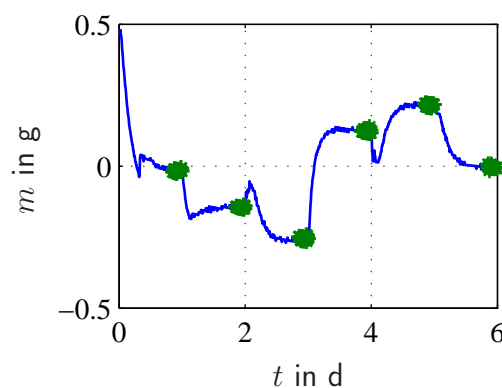


Abbildung 5.29: Zeitlicher Verlauf der driftbefreiten Waagenanzeige (—) und der dazugehörigen statischen Wägewerte (*)

$$w_{statisch} = b_1 \cdot \varphi + b_2 \cdot \vartheta, \text{ mit } b_1 = 20 \text{ mg/\% r.F. und } b_2 = -8,3 \text{ mg/K} \quad (5.29)$$

Abbildung 5.30 zeigt das Modell im Vergleich zur driftfreien Waagenanzeige und das Ergebnis der statischen Klimakompensation. Wie erwartet, ist der Verlauf der klimakompensierten Waagenanzeige in den statischen Punkten nahezu ideal. Bei den Klimawechseln kommt es durch das unterschiedliche Zeitverhalten von Feuchte und Temperatur im Waagengehäuse und der Reaktion der Waage zu dynamischen Kompensationsfehlern. Als Kriterium zur Überprüfung der Kompensationswirkung kann die Standardabweichung der (verbleibenden) Waagenanzeige benutzt werden. Eine ideal kompensierte Waage hätte hierbei eine Standardabweichung von Null. Die Standardabweichung der statisch kompensierten Waagenanzeige beträgt 0,05 g. Im Vergleich hierzu weist die driftbefreite originale Waagenanzeige eine Standardabweichung von 0,15 g auf.

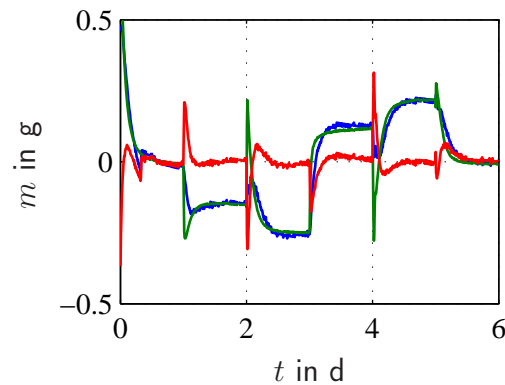


Abbildung 5.30: Zeitlicher Verlauf der driftbefreiten Waagenanzeige (—), des statischen Temperatur- und Feuchtemodells (—) und der mit diesem Modell statisch temperatur- und feuchtekompenzierten Waagenanzeige (—)

5.3.8.2 Dynamische Kompensation der Feuchte- und Temperaturabhängigkeit der Waage

Aufgrund des verbleibenden Restfehlers nach vollzogener statischer Klimakompensation wurde nach dynamischen Modellen gesucht, die diesen Fehler minimieren. Es zeigte sich, daß ein lineares ARX-Modell das Verhalten der driftfreien Waagenanzeige sehr gut beschreibt. Dieses Modell und der nach der dynamischen Kompensation verbleibende Waagenverlauf sind in Abbildung 5.31 im Vergleich zur driftfreien Waagenanzeige dargestellt. Hierbei beträgt die Standardabweichung nach erfolgter dynamischer Klimakompensation 0,01 g.

Die Modellgleichung lautet

$$w_{\text{dynamisch}}(t) = -a_1 \cdot w_{\text{dynamisch}}(t - 10 \text{ min}) + b_{11} \cdot \varphi(t) + b_{12} \cdot \varphi(t - 10 \text{ min}) + b_{21} \cdot \vartheta(t) + b_{22} \cdot \vartheta(t - 10 \text{ min}), \quad (5.30)$$

mit

$$\begin{array}{lll} a_1 = -0,9073 & b_{11} = 2,7 \text{ mg/\% r.F.} & b_{21} = -17,0 \text{ mg/K} \\ & b_{12} = -0,8 \text{ mg/\% r.F.} & b_{22} = 16,3 \text{ mg/K} \end{array}$$

In Abbildung 5.32 sind die Sprungantworten des ermittelten Modells dargestellt.

Auch bei der dynamischen Kompensation lieferten Modelle mit relativer Feuchte als Modelleingangsgröße deutlich bessere Ergebnisse als entsprechende Modelle unter Verwendung der absoluten Feuchte. Bei gleicher Modellstruktur wie beim angegebenen ARX-Modell betrug die Standardabweichung mit der absoluten Feuchte als Modelleingangsgröße 0,13 g.

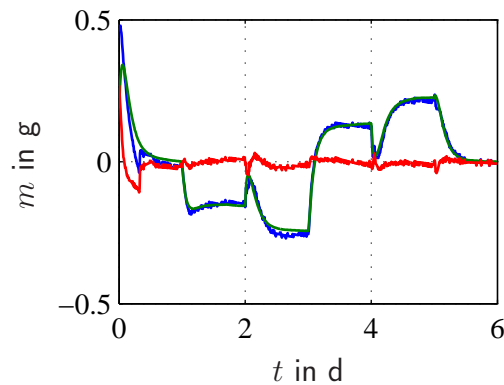


Abbildung 5.31: Zeitlicher Verlauf der driftbefreiten Waagenanzeige der LC 6200 S (—), des dynamischen Temperatur- und Feuchtemodells (—) und der durch dieses dynamische Modell temperatur- und feuchtekompenzierten Waagenanzeige (—)

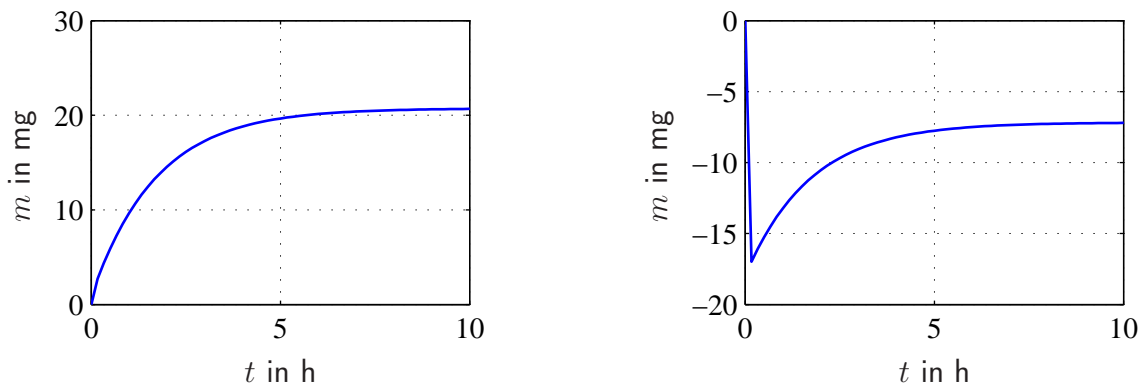


Abbildung 5.32: Reaktion des dynamischen Modells auf einen Sprung der relativen Feuchte im Waagengehäuse um 1 % r.F. (links) und auf einen Sprung der Temperatur im Waagengehäuse um 1 K (rechts)

5.3.8.3 Ergebnisse der mathematischen Klimakompensation

Anhand des gezeigten Beispiels ist die Wirkung von mathematischen Klimakompensationen gut zu erkennen. Durch einfache Algorithmen konnte das Nullpunktsverhalten der Waage deutlich verbessert werden. Dieser Sachverhalt ist in Tabelle 5.6 anhand der Standardabweichungen zusammenfassend dargestellt.

Mittels einer einfachen statischen Temperatur- und Feuchtekomensation konnte die Klimaabhängigkeit der Waage im elektrischen Nullpunkt effizient reduziert werden. Eine Reaktion der Waagenanzeige auf schnelle Klimaänderungen kann durch eine statische Kompensation jedoch nicht gänzlich unterdrückt werden. Dieses Problem wurde durch eine dynamische Kompensation auf der Basis eines linearen ARX-Modells fast vollständig beseitigt.

5 Methoden zur Reduzierung der Feuchteabhängigkeit von Präzisionsmeßgeräten

Originale Waagenanzeige	Driftfreie Waagenanzeige	Statisch kompensierte Waagenanzeige	Dynamisch kompensierte Waagenanzeige
0,19 g	0,15 g	0,05 g	0,01 g

Tabelle 5.6: Standardabweichungen der LC 6200 S im elektrischen Nullpunkt im Originalzustand und nach statischer und dynamischer Klimakompensation

Zur visuellen Beurteilung der Güte der beiden Kompensationsvarianten sind in Abbildung 5.33 die Abhängigkeiten von originaler und kompensierter Waagenanzeige bezüglich der Feuchte und der Temperatur in der Waage dargestellt. Auch hier ist die sehr gute Kompensationswirkung des dynamischen Modells erkennbar.

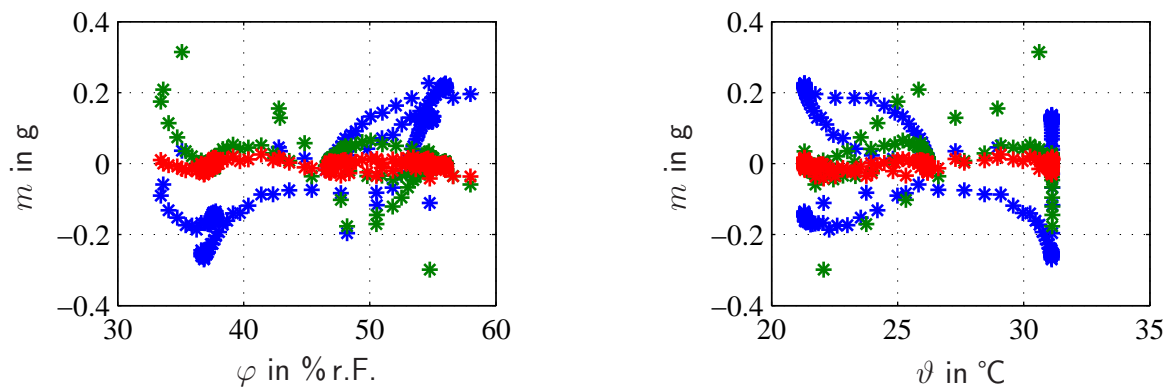


Abbildung 5.33: Abhängigkeit der originalen Waagenanzeige (*), der statisch kompensierten Waagenanzeige (*) und der dynamisch kompensierten Waagenanzeige (*) von der relativen Feuchte und der Temperatur

Weiterhin bestätigte sich zur Feuchtedarstellung die relative Feuchte als richtige Modelleingangsgröße. Sowohl bei der statischen, als auch bei der dynamischen Kompensation waren die Modelle mit der relativen Feuchte als Eingangsgröße den Modellen auf der Basis anderer Feuchtedarstellungen deutlich überlegen.

Durch zusätzliche Messungen wurde die Allgemeingültigkeit der gefundenen Modelle bei anderen Klimaverläufen überprüft. Hierbei zeigte sich, daß sowohl das statische als auch das dynamische Modell das Waagenverhalten im elektrischen Nullpunkt bei allen untersuchten Klimaverläufen deutlich verbesserte.

6 Zusammenfassung

Die Untersuchungen zur Feuchtekompensation von Präzisionsmeßgeräten begannen in der Erwartung, eine Feuchteunabhängigkeit im Rahmen der Auflösung durch geeignete mathematische Kompensationsmodelle zu erzielen. Zahlreiche experimentelle Untersuchungen an Mikro- und Präzisionswaagen bestätigten die ausgezeichnete Funktion von mathematischen Feuchtekompensationen. Allerdings konnte durch analytische Modelle nicht jegliche Feuchteabhängigkeit hinreichend reduziert werden. Verantwortlich für diese Problematik sind vor allem zeitliche Variabilitäten des Feuchteverhaltens, die durch hohe Luftfeuchten hervorgerufen werden können. Deshalb wurden die Untersuchungen um die Bekämpfung der Ursachen der Feuchteabhängigkeit und um Methoden zur Konstanzhaltung der Luftfeuchte im Meßgerät erweitert.

Die Feuchteabhängigkeit eines Meßgerätes resultiert aus der Wasseraufnahme funktionsrelevanter Bauteile. Das aufgenommene Wasser beeinflußt die Anzeige des Meßgerätes durch verschiedene Effekte wie beispielsweise die Veränderung der Masse von Bauteilen, des elektrischen Widerstandes und der Kapazität. Auch die feuchte Luft kann das Meßergebnis unmittelbar beeinflussen (feuchteabhängige Brechzahl der Luft und feuchteabhängige Luftdichte).

Aus diesen Überlegungen heraus wurde ein Sorptionsmodell zur statischen Feuchtekompensation entwickelt. Trotz der Verbindung zum physikalischen Hintergrund der Feuchteabhängigkeit führten mathematische Kompensationen auf der Basis von Sorptionsmodellen zu keinen besseren Ergebnissen als mathematische Kompensationen mit Polynommodellen.

Aus der Gruppe der Polynommodelle eignen sich das ARX-Modell und das OE-Modell besonders gut zur mathematischen Feuchtekompensation. Mit diesen Modellen kann die statische und die dynamische Feuchteabhängigkeit gemeinsam beschrieben werden. Während das ARX-Modell Vorteile bei der Schätzung der Modellparameter aufweist, ist durch das OE-Modell in der Regel eine bessere Adaption an das Feuchteverhalten des Meßgerätes gegeben.

Am Beispiel einer Präzisionswaage wurde eine beachtliche Verringerung der Meßunsicherheit der Waage durch eine mathematische Feuchtekompensation nachgewiesen. Hierbei wurde ebenfalls die Überlegenheit von dynamischen Kompensationsmodellen gegenüber statischen Kompensationsmodellen deutlich.

Weisen Meßgeräte eine stark nichtlineare Feuchteabhängigkeit auf, dann ist eine mathematische Feuchtekompensation durch geeignete Interpolationsansätze sinnvoll.

Ein wichtiger Aspekt bei der mathematischen Feuchtekompensation sind die Wechselwirkungen zwischen Feuchte und Temperatur. Diese resultieren aus dem temperaturabhängigen Sorptionsverhalten von Feststoffen.

Da diese Temperaturabhängigkeit bezüglich der relativen Luftfeuchte am geringsten ist, liefern mathematische Kompensationen mit relativer Luftfeuchte als Modelleingangsgröße in

6 Zusammenfassung

den meisten Fällen die besten Ergebnisse.

Falls, beispielsweise aus Kostengründen, der Einbau eines Feuchtesensors in das Meßgerät nicht möglich ist, kann durch die Annahme einer konstanten mittleren Luftfeuchte die Feuchteabhängigkeit in einer mathematischen Kompensation Berücksichtigung finden. Auch hierbei hat sich als Darstellungsvariante der Luftfeuchte die relative Feuchte als günstig erwiesen.

Eine konstante relative Luftfeuchte im Meßgerät kann durch Feuchtepufferung erzielt werden. Silikagel eignet sich aufgrund der fast idealen Sorptionseigenschaften, des günstigen Preises und des nicht aggressiven Verhaltens gegenüber anderen Materialien hervorragend für diese Anwendung.

Um die Feuchtepufferung zu quantifizieren, wurde ein Gehäusemodell entwickelt. Dieses Modell beschreibt in Abhängigkeit von dem Gehäusevolumen, der Öffnungsgeometrie des Gehäuses und den Eigenschaften des Feuchtepuffers (Feuchtekapazität und Diffusionswiderstand) den diffusiven Feuchtetransport zwischen der Gehäuseluft und der Umgebungsluft.

Zur Erzielung einer optimalen Pufferwirkung wurden Simulationen mit variierenden Gehäuseparametern durchgeführt. Dadurch konnte gezeigt werden, daß ab einer gewissen Menge Puffermaterial die Stabilität der relativen Feuchte im Gehäuse nur durch Vergrößerung der aktiven Fläche des Puffermaterials weiter erhöht werden kann.

Auch bei relativ großen Gehäuseöffnungen kann kurz- und mittelfristig eine gute Konstanz der relativen Feuchte im Gehäuse erzielt werden.

Prinzipiell stellt der Einsatz von feuchtepuffernden Materialien eine preisgünstige und sehr wirksame Methode zur Reduzierung der Auswirkungen der Feuchteabhängigkeit eines Meßgerätes dar.

Bei der Konstruktion von Meßgeräten sollte an funktionsrelevanten Bauteilen der Einsatz von feuchtesensiblen Materialien vermieden werden. Läßt sich dieser Grundsatz nicht konsequent verwirklichen, so ist es durch Kapselung, Abdichtung oder Versiegelung möglich, die feuchtesensiblen Bauteile vor Beladungsänderungen zu schützen. Experimentelle Untersuchungen bestätigten die Verringerung der Feuchteabhängigkeit verschiedener Einzelbauteile durch geeignete Maßnahmen (Kapselung der Kompensationsspulen von Mikrowaagen, Versiegelung von Dehnungsmeßstreifen von Präzisionswaagen).

Zur Ermittlung der Feuchteabhängigkeit von Präzisionsmeßgeräten müssen experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden. Hierzu werden Sensoren zur Feuchtemessung und ein Prüfraum mit einstellbarer Luftfeuchte und Lufttemperatur benötigt.

Der zeitliche Ablauf der experimentellen Untersuchungen muß gewissen Kriterien genügen, um statistisch gesicherte Aussagen über das Feuchte- und Temperaturverhalten des Meßgerätes treffen zu können. Ein wesentliches Kriterium ist hierbei die Orthogonalität des Versuches. Zur korrekten Trennung der Auswirkungen von Feuchte- und Temperatureinflüssen auf das Meßgerät müssen Feuchte- und Temperaturverlauf orthogonal, das heißt unkorreliert, zueinander sein.

Die Überprüfung der meßtechnischen Eigenschaften verschiedener Feuchtesensoren zeigte, daß eine Kalibrierung der verwendeten Feuchtesensoren (unabhängig von der Herstellerspe-

zifikation) die Grundvoraussetzung für eine präzise Feuchtemessung darstellt.

Da kommerziell erhältliche Klimaprüfkammern nicht speziell zur Untersuchung der Feuchteabhängigkeit von Präzisionsmeßgeräten entwickelt wurden, ist bei der Qualität der Feuchte-konditionierung durchaus Potential für weitere Verbesserungen vorhanden.

In Bezug auf statische Regelschwankungen sind kontinuierlich feuchtekonditionierende Verfahren zu bevorzugen. Besonders hervorzuheben ist die Feuchtekonditionierung auf der Basis eines thermostatisierten Feuchtepuffers. Hierbei sind Regelschwankungen der Luftfeuchte in der Größenordnung der Auflösung der Feuchtesensorik erreichbar. Weiterhin können durch dieses Verfahren auch extreme Feuchtezustände realisiert werden. Durch die Absorptionswirkung des Feuchtepuffers wird eine Anreicherung der Luft mit Aerosolen stark unterdrückt. Bei einer kombinierten Konditionierung von Luftfeuchte und Lufttemperatur ist die absolute Luftfeuchte die zu bevorzugende Darstellungsvariante der Feuchte als Regelgröße. Dieser Ansatz gewährleistet eine temperaturunabhängige Regelung der Luftfeuchte, welche eine gravierende Verbesserung der Regelgüte zur Folge hat.

Die vorliegende Arbeit ist eine systematische Abhandlung der Problematik der Feuchte-kompensation von Präzisionsmeßgeräten. Eine konsequente Umsetzung der vorgestellten Methoden ermöglicht die Verringerung der Feuchteabhängigkeit von Präzisionsmeßgeräten.

Literaturverzeichnis

- [1] Autorenkollektiv. *Technische Formeln*. VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1962.
- [2] E. Bagda. *Berechnen instationärer Wärme- und Feuchteströme*. Expert Verlag, 1991.
- [3] W. Boening. *Einführung in die Berechnung elektrischer Schaltvorgänge*. VDE-Verlag, 1992.
- [4] J. Bürger. *Rechnergestützte Regelung einer Klimaprüfkammer*. Diplom, Technische Universität Ilmenau, 1996.
- [5] U. Busweiler. *Nichtisotherme Ad- und Desorptionskinetik an Einzelkörnern Technischer Adsorbentien am Beispiel der Wasserdampfsorption an Silicagel und Molekularsieb*. Dissertation, 1984.
- [6] J. Crank. *The Mathematics Of Diffusion*. Clarendon Press, 1975.
- [7] Engelhard. *Product Information KC-Trockenperlen*. Engelhard Corp., 1995.
- [8] T. Fröhlich. *Dynamische Temperaturkompensation von Präzisionsmeßgeräten*. Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 1997.
- [9] U. Gerhardt. *Signalverarbeitung in der interferenzoptischen Meß- und Sensortechnik*. Dissertation, Isle Verlag, 1997.
- [10] D. Heinze. *Theoretische Grundlagen und Meßverfahren der Gasfeuchte-meßtechnik*. Technische Hochschule Ilmenau.
- [11] D. Sonntag/D. Heinze. *Sättigungsdampfdruck- und Sättigungsdampfdruckdichtetafeln für Wasser und Eis*. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig, 1982.
- [12] F. Hilbrunner. *Bestimmung von Temperatur- und Feuchteinflüssen bei Präzisionsmeßgeräten*. Diplom, Technische Universität Ilmenau, 1996.
- [13] T. Fröhlich/F. Hilbrunner. *Vorrichtung und Verfahren zur Einstellung oder Regelung der Gasfeuchte in nahezu abgeschlossenen Räumen*. Deutsche Patentanmeldung DE 10222438A1, 2003.
- [14] D. Kreß/R. Irmer. *Angewandte Systemtheorie*. VEB Verlag Technik, 1989.

- [15] F. Jokisch. *Über den Stofftransport im hygroskopischen Feuchtebereich kapillarporöser Stoffe am Beispiel des Wasserdampftransports in technischen Adsorbentien*. Dissertation, 1975.
- [16] W.W. Kanoldt. *Nicht-Isotherme Adsorption am Adsorptionseinkorn*. Dissertation, München, 1992.
- [17] G. Dagan/U. Hornung/P. Knaber. *Mathematical modeling for flow and transport through porous media*. Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [18] M. Kochsiek. *Handbuch des Wägens*. Friedr. Vieweg & Sohn, 1985.
- [19] M. Kochsiek. *Grundlagen der Massebestimmung*. Mettler-Toledo AG, 1991.
- [20] S. Krämer. *Ein Beitrag zur rechnerischen Beschreibung des feuchteabhängigen Werkstoffverhaltens*. Dissertation, Technische Hochschule Aachen, 1987.
- [21] W. Krause. *Gerätekonstruktion*. Verlag Technik, Berlin, 1986.
- [22] L. Ljung. *System Identification Toolbox*. The Math Works, 1992.
- [23] F. Locher. *Numerische Mathematik für Informatiker*. Springer-Lehrbuch, 1993.
- [24] M. Schuster. *Visualisierung von Spline-Kurven und -Flächen unter C++*. Diplom, Fachhochschule Dortmund, 2001.
- [25] H. R. Schwarz. *Numerische Mathematik*. B. G. Teubner Stuttgart, 1997.
- [26] R.P.W. Scott. *Silica Gel and Bonded Phases*. John Wiley & Son, 1993.
- [27] D. Sonntag. *Hygrometrie*. Akademie-Verlag, Berlin, 1966-1968.
- [28] D. Sonntag. *Advancements in the field of hygrometry*. 1994.
- [29] Setra Systems. *Humidity control system for a scale*. Internationale Patentanmeldung WO 90/04153, 1989.
- [30] M. Kochsiek/M. Gläser und weitere. *Comprehensive Mass Metrology*. Wiley-VCH, Berlin, 2000.
- [31] C. Waller. *Stabilisierung von Klimawerten*. Bamberg, 1998.
- [32] J. Wernstedt. *Experimentelle Prozeßanalyse*. VEB Verlag Technik Berlin, 1989.
- [33] S. Weyhe. *Wägetechnik im Labor*. Sartorius, Verlag Moderne Industrie, 1997.
- [34] G. Wilkening. *Kompensation der Luftbrechzahl*. VDI Bildungswerk, 1993.

Zeichen und Abkürzungen

Physikalische Größen

A	Fläche
C	(Feuchte-) Kapazität
c	Konzentration, in Luft absolute Feuchte
c_S	Sättigungskonzentration
D	Diffusionskoeffizient
f	Frequenz
h	Enthalpie
l	Länge
n	Brechzahl (Refraktivität)
m	Masse
p	Druck
p_D	Dampfdruck
p_S	Sättigungsdampfdruck über Wasser in reiner Phase
p'_S	Sättigungsdampfdruck über Wasser in Luft
$p_0 = 101325 \text{ Pa}$	Normaldruck
R	(Feuchte-) Widerstand
$R_a = 8,31451 \text{ J}/(\text{Mol} \cdot \text{K})$	allgemeine Gaskonstante
R_s	spezielle Gaskonstante
$R_D = 461,52 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	spezielle Gaskonstante für Wasserdampf
T	absolute Temperatur
t	Zeit
V	Volumen
x	Weg
X	Beladung
φ	relative Feuchte
ϑ	(Celsius-) Temperatur
$\vartheta_{T_{au}}$	Taupunkttemperatur
ρ	Dichte
ψ	Porosität
δ	Wellenzahl
γ	kubischer Ausdehnungskoeffizient

Mathematische Operatoren

$A(q), B(q), C(q), D(q), F(q)$	Matrizen der Modellparameter
a, b, c, d, f	Modell-, Gleichungsparameter
B, TB	B-Spline, tensorierter B-Spline
E	Empfindlichkeit der Kennlinie
e	Modellfehler
FK	Feuchtekoeffizient
f	Funktion, oder f -Faktor
G	Übertragungsfunktion
g	Gewichtsfunktion
h	Übergangsfunktion (Sprungantwort)
i, j, k, l, m, n	Laufvariablen, bzw. Anzahl
k	Erweiterungsfaktor
N	Nullpunkt der Kennlinie
na, nb, nc, nd, nf	Anzahl der Modellparameter
nk	Anzahl der diskreten Verzögerungen
p	Laplace-Operator
q	zeitdiskreter Verschiebeoperator
r	Radius
TK	Temperaturkoeffizient
U	Matrix der Modelleingangsgrößen
u	allgemeine Modelleingangsgrößen
W	Kompensationsmatrix
w	Kompensationsmodell
x	Meßobjekt (allgemein Systemeingang)
y	kompensierte Anzeige des Meßgerätes
y^*	unkompensierte Anzeige des Meßgerätes
α, β	Gleichungsparameter
τ	Zeitkonstante

Abkürzungen

ARX-Modell	Autoregressives Modell
DMS	Dehnungsmeßstreifen
EMK	elektromagnetische Kraftkompensation
OE-Modell	Output-Error Modell
Pt 100, Pt 1000	Platinmeßwiderstand mit 100 Ω , bzw. 1 k Ω
	Grundwiderstand
r. F.	relative Feuchte